

05.1;06.2;12

©1993

## ВЛИЯНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ПРОБОЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МДП СТРУКТУР

*В.М. Масловский, Ю.О. Личманов, Е.В. Симанович*

До настоящего времени, несмотря на интенсивные исследования дефектов в тонкопленочных МДП структурах на основе кремния [1,2], отсутствует физическая модель, связывающая процесс необратимого пробоя тонкой пленки  $\text{SiO}_2$  с параметрами протяженных дефектов у межфазной границы  $\text{Si-SiO}_2$ . Известно, что эти дефекты определяют темп деградационных процессов в МДП структурах при радиационных воздействиях и инжекции носителей в диэлектрик [1-3].

В настоящей работе впервые установлена связь геометрических параметров протяженных дефектов как с зарядовой стабильностью МДП структур, так и с вольт-амперными характеристиками (ВАХ) этих структур после необратимого пробоя диэлектрика. Использовалась новая экспериментальная методика — регистрация гистограмм зарядовой стабильности (распределение МДП структур по величине заряда  $Q$ , пропускание которого через диэлектрик приводит к его необратимому пробую). Гистограммы регистрировались подключением МДП структур к источнику тока при положительном напряжении на Al-электроде. Определялась величина пропущенного через структуру заряда, при которой резко уменьшалось падение напряжения на ней при монотонном увеличении пропускаемого тока.

Исследование проводилось на МДП структурах, сформированных на одной кремниевой пластине КЭФ-4,5 термическим окислением в атмосфере сухого кислорода и последующим нанесением Al-электрода площадью  $S = 1 \text{ мм}^2$ . Толщина диэлектрика составляла величину  $d = 30 \text{ нм}$ . Левый пик на гистограмме (рис. 1) соответствовал исходно дефектным структурам, средний — потенциально ненадежным, третий —  $Q > 10^{-3} \text{ Кл}$  — “бездефектным” структурам. Малую зарядовую стабильность вполне естественно связывать с наличием протяженных дефектов межфазной границы  $\text{Si-SiO}_2$ . Полагая, что эти протяженные дефекты распределены по поверхности межфазной границы случайным образом, их концентрация, выявляемая с помощью гистограмм зарядовой стабильности, в соответствие с распределением Пуассона:  $D = S^{-1} \ln(1 - w)$ , где  $w$  — доля де-

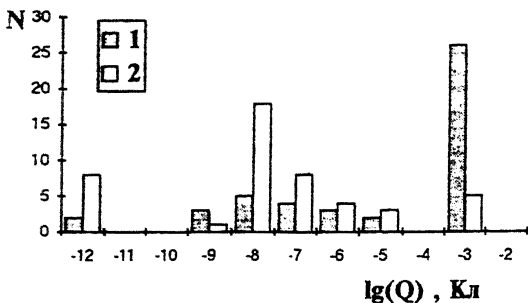


Рис. 1. Типичные гистограммы зарядовой стабильности тонкопленочных МДП структур, сформированных на одной пластине кремния. 1 — исходная пластина, 2 — та же пластина после  $\gamma$ -облучения.

фектных структур (левый и средний пик на гистограмме рис. 1). Для исходной пластины (рис. 1,а)  $w = 0.42$  и, соответственно,  $D = 55 \text{ см}^{-2}$ . Для установления природы влияния протяженных дефектов использовалось  $\gamma$ -облучение ( $\text{Co}^{60}$ ) той же пластины (рис.1,б). Это позволило выявить в 4 раза бóльшую концентрацию микродефектов ( $W_\gamma = 0.89$ ,  $D_\gamma = 22 \text{ см}^{-2}$ ), что обусловлено накоплением положительного встроенного в  $\text{SiO}_2$  заряда, о чем свидетельствовал сдвиг вольт-фарадных (С-V) характеристик МДП структур. Важный результат состоит в том, что отсутствовал относительный сдвиг этих характеристик (измеряемых перед регистрацией гистограмм зарядовой стабильности) для МДП структур с малой и большой зарядовой стабильностью. Таким образом, эти результаты подтверждают, что зарядовая стабильность определяется протяженными дефектами, площадь которых на несколько порядков меньше площади электрода и поэтому не дающими заметного вклада в С-V характеристику.

Для выяснения природы дефектов, плотность которых определялась из анализа гистограмм зарядовой стабильности, использовалась растровая электронная микроскопия (РЭМ). РЭМ изображение пластин со сформированными на них МДП структурами формировалось в режиме регистрации медленных электронов, энергия которых не превышала 50 эВ. Областям с более высоким отрицательным потенциалом соответствовала большая амплитуда видеосигнала [3]. РЭМ изображение свидетельствует о наличии неоднородности потенциала размером 0.3–1 мкм по поверхности пластины с плотностью  $D_T = 1 - 3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$ . Оказалось, что повышенная концентрация  $D_T$  хорошо коррелировала с повышенной концентрацией  $D$ . На ряде пластин распределение протяженных дефектов носило свирлевой характер.

Вполне естественно предположить, что аналогичный потенциальный контраст возникает во время инжекции электронов в диэлектрик при регистрации зарядовой стабильности. Тогда огромная разница на 5–7 порядков в зарядовой стабильности “бездефектных” и потенциально ненадежных МДП структур обусловлена геометрическими факторами: отношение площади дефектной области межфазной границы, характеризующейся большой плотностью поверхностных состояний, к площади Al электрода составляет именно такую величину:  $10^{-7} - 10^{-5}$ .

Отсутствие сдвига пика бездефектных МДП структур (рис. 1, а, б) после  $\gamma$ -облучения свидетельствует, что пробой этих структур определяется бездефектным объемом диэлектрика и характеризуется плотностью заряда, приводящего к пробоя диэлектрика  $10^{-1} < Q < 1 \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$ . Таким образом, дефекты межфазной границы Si-SiO<sub>2</sub> лишь локализуют ток утечки через диэлектрик, что значительно уменьшает его зарядовую стабильность. Этот результат согласуется также с тем, что вид ВАХ всех трех типов МДП структур после необратимого пробоя описывается одинаковой степенной зависимостью (рис. 2).

Ниже будет показано, что такой вид ВАХ соответствует проводимости электронов по поверхности микротрещины в диэлектрической пленке, образовавшейся в результате необратимого пробоя диэлектрика и формирующейся в области протяженного дефекта у межфазной границы, который и ограничивает ее длину.

Будем полагать, что проводимость микротрещины определяется спектром локализованных состояний на поверхности микротрещины. При растрескивании окисла оборванные связи формируют локализованные состояния. Электроны, инжектируемые из катода, захватываются на эти поверхностные состояния (ПС). Термическая генерация носителей с этих состояний и обеспечивает протекание тока, аналогично режиму тока, ограниченного объемным зарядом.

Ток через единицу длины поверхности микротрещины равен  $J = \sigma E$ , где  $E$  — поле на микротрещине,  $\sigma$  — поверхностная проводимость.

Будем полагать, что распределение поверхностных ловушек по энергии, отсчитываемой от порога подвижности, экспоненциальное:

$$N(\varepsilon) = \frac{N_t}{kT_c} \exp(-\varepsilon/kT_c), \quad (1)$$

где  $N_t$  — концентрация ПС,  $T_c$  — параметр, характеризующий это распределение. Тогда плотность заполненных ло-

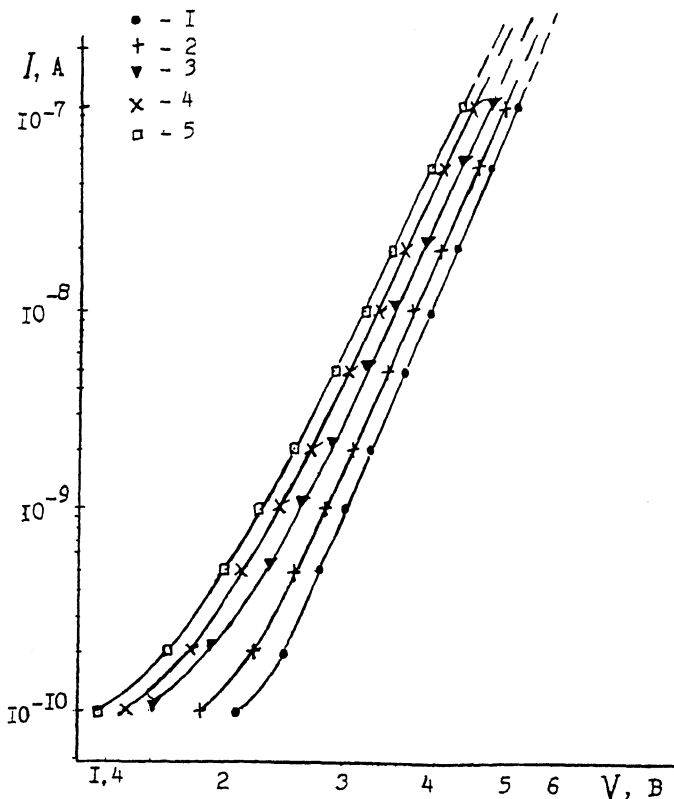


Рис. 2. ВАХ пробитой МДП структуры на той же пластине.  $V_t = 18$  В,  $I(V = V_t) = 7 \times 10^{-3}$  А,  $T_c = 2250$  К. Кривые соответствуют следующим температурам: 1 — 22, 2 — 50, 3 — 70, 4 — 80, 5 — 90° С.

вусек

$$n_t = \int_{\varepsilon_F}^{\infty} \frac{N_t}{kT_c} \exp(-\varepsilon/kT_c) d\varepsilon, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_F$  — энергетическое положение квазиуровня Ферми для электронов, отсчитываемое от порога подвижности. Поверхностная проводимость в двумерных системах выражается следующим образом [4]:

$$\sigma = \sigma_m \exp\left(-\frac{\varepsilon_F}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $\sigma_m \approx 0.1q^2/h \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$  — минимальная металлическая проводимость в двумерных системах,  $q$  — заряд электрона,  $h$  — постоянная Планка. Подставляя  $\varepsilon_f$  из (3) в (2), получим

$$n_t = N_t \left( \frac{\sigma}{\sigma_m} \right)^{T/T_c} \quad (4)$$

Полный заряд на ПС, однородно распределенных по поверхности микротрещины, на единицу длины микротрещины равен  $qn_t d = C_0 V$ , где  $C_0 \approx \frac{\varepsilon_d}{\pi}$  — геометрическая емкость единицы длины микротрещины, аналогично емкости плоского диэлектрического диода с конечным поперечным сечением при протекании тока, ограниченного объемным зарядом [5],  $V$  — положительное напряжение на МДП структуре,  $\varepsilon_d$  — диэлектрическая проницаемость  $\text{SiO}_2$ . Тогда, используя выражение для тока  $J$ , а также выражение (4), в котором для поля берется среднее значение  $E = V/d$ , получаем

$$C_0 V = q N_t d \left( \frac{J d}{\sigma_m V} \right)^{T/T_c}$$

Отсюда ВАХ МДП структуры после необратимого пробоя:

$$I = \sigma_m l \frac{V_t}{d} \left( \frac{V}{V_t} \right)^{T_c/T+1}, \quad (5)$$

где  $l$  — длина микротрещины, а  $V_t = q N_t d / C_0$ .

Полученное выражение (5) соответствует экспериментальным ВАХ, полученным в [6]. Сопоставление с экспериментальными ВАХ (рис. 2) показывает, что теоретические ВАХ согласуются с экспериментальной зависимостью при длинах микротрещины в диапазоне 0.3–1 мкм. Так, значение параметра  $V_t = 18 \text{ В}$  соответствует плотности ПС на поверхности микротрещины:

$$N_t = \frac{\varepsilon_d V_t}{\pi q d} \approx 10^{14} \text{ см}^{-2},$$

а длина микротрещины  $l$ , соответствующая значению тока  $I = 7 \cdot 10^{-3} \text{ А}$  при  $V = V_t$ , равна  $l = I \cdot d / (\sigma_m V_t) = 5 \cdot 10^5 \text{ см}$ . Этот результат подтверждает развитые представления о роли протяженных дефектов при пробое диэлектрика — длина образовавшейся сквозной микротрещины соответствует характерной длине протяженных дефектов, полученных из анализа РЭМ-изображений.

Таким образом, теория электронной проводимости микротрещины в диэлектрике, развитая в работе, позволяет объяснить ВАХ тонкопленочных МДП структур после пробоя диэлектрика. Установлено, что зарядовая стабильность этих структур определяется площадью области локализации тока заряженными протяженными дефектами у границы Si-SiO<sub>2</sub>.

#### Список литературы

- [1] Румак Н.В. Система кремний-двуокись кремния в МОП-структурах. Минск, 1986.
- [2] Fishetty M.V. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. P. 2860-2875.
- [3] Козлитин А.И., Колобов Н.А., Масловский В.М., Минаев В.В., Тарасенко В.В. // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1989. В. 5(134). С. 14-17.
- [4] Мотт Н., Левис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982. Т. 1. 368 с.
- [5] Ламперт П., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 416 с.
- [6] Nakhmanson R.S., Roizin Ya.O. // Thin Solid Films. 1978. V. 55. P. 169-178.

Научно-исследовательский  
институт физических проблем  
им.Ф.М.Лукина  
Москва

Поступило в Редакцию  
26 сентября 1993 г.