

- [1] Šubertová S. // Czech. J. Phys. 1965. N 15. P. 701—702.  
 [2] Мкртчян А. Р., Галечян Г. А., Диванян Э. Г. // Изв. АН АрмССР. Физика. 1987. Т. 22. С. 231—233.  
 [3] Ацагорцян К. Э., Галечян Г. А., Диванян Э. Г. // Тез. докл. Всесоюз. семинара «Процессы нонизации с участием возбужденных атомов». Л., 1988. С. 88—89.

Институт прикладных проблем физики АрмССР  
 Ереван

Поступило в Редакцию  
 30 января 1989 г.

06

Журнал технической физики, т. 60, в. 2, 1990

© 1990 г.

## ПЕРЕЗАРЯДКА МТДП СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ РОСТА ТУННЕЛЬНО ПРОЗРАЧНОГО ОКИСЛА

А. П. Федчук, Л. Д. Шевченко

МДП структуры с туннельно прозрачным окислом (МТДП) представляют собой интереснейший объект для исследования процессов переноса и накопления заряда [1, 2]. В ряде случаев в качестве диэлектрика применяют собственный анодный окисел (АО) полупроводниковой подложки [3, 4]. Процесс формирования АО протекает при температурах 300—350 К, что обеспечивает сохранность предварительно созданного пространственного распре-

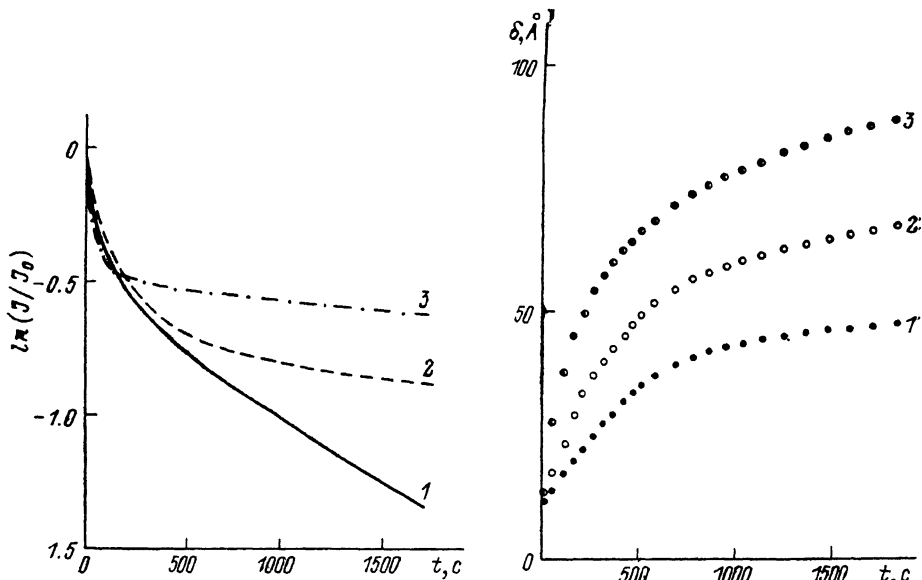


Рис. 1. Кинетические характеристики тока в электрохимической ячейке в процессе формирования АО кремния при разных напряжениях.

1 — 10, 2 — 20, 3 — 30 В.

Рис. 2. Расчетный вид временной зависимости толщины туннельно прозрачного АО при различных формирующих напряжениях.

1—3 — то же, что на рис. 1.

деления легирующей примеси в подложке. При этом практически важный вопрос непрерывного контроля толщины туннельно прозрачного АО остается открытым.

В данной работе исследовались кинетические характеристики (КХ) тока в электрохимической ячейке, контролируемого растущим АО. Окислялся монокристаллический *p*-Si ориентации (111) с концентрацией примеси бора  $N_A = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . АО формировался в потенциостатическом режиме в водном растворе щавелевой кислоты. КХ снимались с помощью

потенциостата ПИ-50-1 и регистрировались двухкоординатным самописцем ПДП4-002. КХ тока в ячейке, снятые при различных напряжениях, показаны на рис. 1. Вид этих кривых дает возможность выразить зависимость  $J(t)$  в виде

$$J(t) = J_{01} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + J_{02} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (1)$$

причем  $\tau_1 \ll \tau_2$ . Заметно, что различие между  $\tau_1$  и  $\tau_2$  становится более резким по мере увеличения формирующего напряжения. При этом точка перегиба зависимости  $J(t)$  сдвинется в область меньших времен. Перегиб КХ может быть связан с изменением прозрачности потенциального барьера АО после формирования плотного барьерного окисла.

Наблюдаемые особенности КХ могут быть описаны на основе эквивалентной схемы МТДП структуры, приведенной в работах [5, 6]. Динамическими параметрами этой схемы являются емкость АО  $C_i$  и его сопротивление  $R_i$ , причем  $C_i$  убывает, а  $R_i$  возрастает по мере увеличения толщины АО  $\delta$ . Подобное рассмотрение справедливо при условии  $C_{\text{опа}} < C_i \ll C_{\text{по}}$ , где  $C_{\text{опа}}$  — емкость области пространственного заряда полупроводника, а  $C_{\text{по}}$  — емкость поверхностных состояний. Это условие выполняется в случае слабо легированного полупроводника, что характерно для исследуемых нами образцов.

Дифференциальное уравнение, описывающее зависимость  $J(t)$ , может быть записано в виде

$$J(t) + C_i(t) \frac{d}{dt} [J(t) R_i(t)] = \frac{V - J(t) R_i(t)}{R_i(t)}, \quad (2)$$

при этом

$$C_i(t) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i S}{\delta(t)}, \quad (3)$$

где  $S$  — площадь образца,  $V$  — напряжение формирования АО.

По условию эксперимента рассматривается область значений  $\delta(t)$ , обеспечивающих туннельный перенос электронов через растущий АО. Следовательно, вольт-амперная характеристика МТДП структуры представляется выражением

$$J(V) = A \left(\frac{V}{\delta}\right)^2 \exp\left(-\frac{B\delta}{V}\right), \quad (4)$$

где

$$A = \frac{q^3 S}{8\pi h \chi_m}, \quad B = \frac{8\pi}{3h q} (2m_p)^{1/2} \chi_m^{3/2},$$

$m_p$  — эффективная масса носителей тока,  $\chi_m$  — электронное сродство полупроводника.

Тогда

$$R_i = \frac{\partial V}{\partial J} = \frac{\delta^2}{A} \exp\left(\frac{B\delta}{V}\right) \frac{1}{2V + B\delta}. \quad (5)$$

Вводя безразмерную переменную  $z(t) = (B\delta(t))/V$ , преобразуем уравнение (2) к виду

$$\frac{dz}{dt} = \frac{A^2 B^2}{\epsilon_0 \epsilon_i S J(t)} (2+z)^3 \exp(-2z) - \frac{2AB}{\epsilon_0 \epsilon_i S} (2+z)^2 \exp(-z) - \frac{z(2+z)}{J(t)} \frac{dJ(t)}{dt}. \quad (6)$$

Для значений  $\delta(t)$ , близких к верхней границе туннельной прозрачности, экспоненциальными членами можно пренебречь, тогда уравнение (6) упрощается

$$\frac{dz}{dt} \approx - \frac{z(2+z)}{J(t)} \frac{dJ(t)}{dt}. \quad (7)$$

Интегрирование этого выражения дает для искомой зависимости  $\delta(t)$  следующее выражение:

$$\delta(t) = 2V \left\{ \left( B + \frac{2V}{\delta_0} \right) \left[ \frac{J_{01} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + J_{02} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)}{J_{01} + J_{02}} \right]^2 - 1 \right\}^{-1}, \quad (8)$$

где  $\delta_0$  — толщина естественного окисла на поверхности кремния.

В области нижней границы области существования  $\delta(t)$  уравнение (6) также может быть упрощено

$$\frac{dz}{dt} \approx \frac{A^2 B^3}{\varepsilon_0 \varepsilon_s S} \frac{(2+z)^3}{J(t)} \exp(-2z). \quad (9)$$

Решение этого уравнения записывается в виде

$$(1+2z) \frac{z^2 - 2z - 6}{4(z+2)^2} = (1+2z_0) \frac{z_0^2 - 2z_0 - 6}{4(z_0+2)^2} + \frac{A^2 B^3}{\varepsilon_0 \varepsilon_s S} \frac{J_{01} \tau_1}{J_{02}} \ln \left[ \frac{1 + \frac{J_{02}}{J_{01}} \exp\left(\frac{t}{\tau_1}\right)}{1 + \frac{J_{02}}{J_{01}}} \right], \quad (10)$$

где  $z_0 = (B \delta_0)/V$ .

Сшивка решений (8) и (10) дает приближенный ход временной зависимости толщины АО  $\delta(t)$ , которая представлена на рис. 2. Эта зависимость проявляет перегиб при значении  $\delta_{кв} = 30 \text{ \AA}$ , что совершенно очевидно коррелирует с отмеченным ранее перегибом на зависимости  $J(t)$ . Полученное значение толщины АО, соответствующей перегибу зависимости  $\delta(t)$ , может быть принято в качестве условной границы между малыми и большими значениями толщины туннельно прозрачного АО. При этом вполне естественно предположить, что толщина АО, при которой происходит изменение скорости роста АО, представляет собой толщину плотного барьерного окисла на поверхности полупроводника. Полученная временная зависимость толщины АО включает величину формирующего напряжения как параметр, что делает полученное решение не только физически содержательным, но и практически полезным.

Основными результатами данной работы являются установление однозначной зависимости толщины туннельно прозрачного АО от временных характеристик тока в электро- или плазмохимической ячейке, а также получение оценочного значения толщины барьерного окисла на поверхности кремния.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность С. И. Радауцану за постоянное внимание к работе и стимулирующие дискуссии.

#### Список литературы

- [1] Саченко А. В., Снитко О. В. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников. Киев: Наукова думка, 1984. 232 с.
- [2] Вуль А. Я., Саченко А. В. // ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 8. С. 1364—1377.
- [3] Аверьянов Е. Е. Плазменное анодирование в радиоэлектронике. М.: Радио и связь, 1983. 78 с.
- [4] Шевченко Л. Д., Федчук А. П., Цыбанев Н. Н. // Тр. IX Всесоюз. симпозиума «Электронные процессы на поверхности и в тонких слоях полупроводников». Новосибирск, 1988. Ч. 2. С. 194.
- [5] Chebotin V. N., Remez I. D., Solovieva L. M., Karpachev S. V. // Electrochimica Acta. 1984. Vol. 29. N 10. P. 1381—1388.
- [6] Sands D., Bremson K. M., Thomas C. B. // Sol. St. Electron. 1987. Vol. 30. N 5. P. 543—548.

Одесский государственный университет  
им. И. И. Мечникова

Поступило в Редакцию  
2 февраля 1989 г.

04  
© 1990 г.

Журнал технической физики, т. 60, в. 2, 1990

## ОБ ЭНЕРГИИ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

С. И. Степанов

Существующие обзоры наблюдений [1-4] вполне едины в отношении свойств шаровой молнии (ШМ). Исключением является энергия ШМ. Обычно в качестве характерного значения энергии ШМ приводят цифры  $10^3$ — $10^4$  Дж. Однако достоверно наблюдалось энерговыделение  $10^5$ — $10^6$  Дж и более (см. также [5]). Это превосходит возможную величину