

06;12

РЕЖИМЫ ПОРООБРАЗОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ТОКОВЫМИ НЕУСТОЙЧИВОСТЯМИ

© В.С.Кузнецов, А.В.Проказников

Проведено теоретическое исследование модели образования пористого кремния при анодном травлении в растворе плавиковой кислоты. Учтено, что на порообразование влияют как процессы в тонком слое окисла на поверхности кремния, так и образование неоднородных структур и токовых шнуров в приповерхностной области пространственного заряда кремния из-за генерационно-рекомбинационной неустойчивости в области сильных электрических полей. В модели рассматривается межзонная ударная ионизация и ионизация зона—ловушка с коэффициентами генерации, зависящими от напряженности прикладываемого электрического поля. Учет этих эффектов приводит к появлению нескольких стационарных токовых состояний полупроводника, к бистабильности и к зависностям с отрицательной дифференциальной проводимостью.

В настоящее время исследования физико-химических свойств пористого кремния (ПК) направлены на поиск возможностей их использования при создании конкретных электронных приборов. Физико-химические свойства ПК во многом связаны с особенностями его морфологической структуры [1,2]. Несмотря на большое число работ, которые посвящены исследованию закономерностей, управляющих процессами порообразования, к настоящему моменту отсутствует единая точка зрения по данной проблеме [3,4]. Характерной особенностью существующих в настоящее время моделей процесса порообразования является то, что в них, как правило, рассматриваются физико-химические процессы, управляющие ростом одной изолированной поры. Корреляция процессов порообразования рассматривается лишь в какой-то мере между ближайшими порами и учитывается исключительно наличием обедненного слоя около поры, который определяет расстояние между порами [5].

Как было показано в работе [6], при определенных режимах анодирования могут иметь место крупномасштабные корреляции в расположении пор, которые приводят к образованию целых массивов определенным образом упорядоченных пор. Это явление самоорганизации в процессах порообразования связано со специфическим поведением вольт-амперной характеристики (ВАХ), которая имеет участок с отрицательной дифференциальной проводимостью. Нелинейная форма поведения ВАХ отмечена также в работах [7,8], где приведены соответствующие кривые. В дан-

ной работе предложена модель порообразования в кремнии, основанная на наличии токовых неустойчивостей, вызванных перегревом носителей [9]. Ради упрощения расчетов мы ограничились рассмотрением лишь генерационно-рекомбинационных процессов, приводящих к неустойчивостям из-за ударной ионизации в области сильных электрических полей [10].

Рассмотрим случай, когда имеется образец кремния n -типа с концентрациями свободных электронов n и свободных дырок p .

Уравнения непрерывности для n , p , концентрации ионизированной N^+ и нейтральной примеси в основном состоянии N_0^0 имеют вид

$$\frac{dn}{dt} - \nabla \mathbf{j}_n = \varphi_n; \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} + \nabla \mathbf{j}_p = \varphi_p; \quad (2)$$

$$\frac{dN^0}{dt} = \varphi_0; \quad (3)$$

$$\frac{dN^+}{dt} = \varphi_+. \quad (4)$$

Здесь учтено, что $N^+ + N_0^0 + N_1^0 = N$ — концентрация примеси в образце постоянна; N_1^0 — концентрация нейтральной примеси в возбужденном состоянии;

$$\mathbf{j}_n = n\mu_n \mathbf{E} + D_n \nabla n;$$

$$\mathbf{j}_p = p\mu_p \mathbf{E} - D_p \nabla p$$

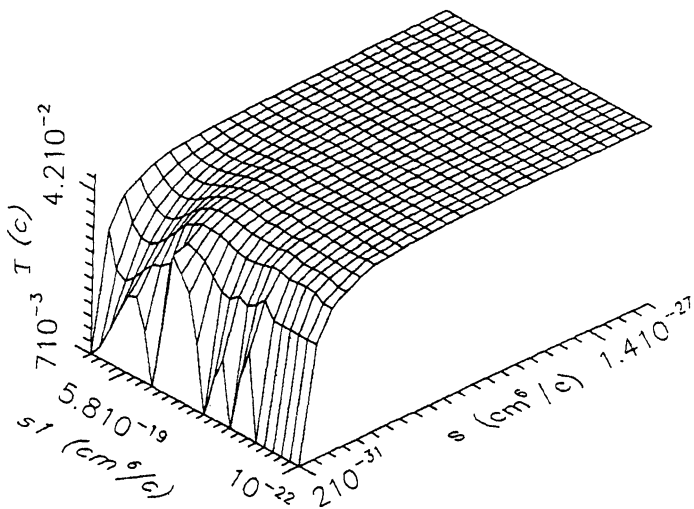
представляют собой соответствующие плотности токов; μ_{np} , D_{np} — подвижности и коэффициенты диффузии, а φ_n , φ_p , φ_0 , φ_+ — скорости генерации-рекомбинации:

$$\begin{aligned} \varphi_n = & \gamma - \alpha np + c_1 N^0 - c_2 n N^+ + c_1^*(N - N^0 - N^+) - \\ & - c_2^* n N^+ + s n p^2 + s_1 (N - N^0 - N^+) p^2; \end{aligned}$$

$$\varphi_p = \gamma - \alpha np + s n p^2;$$

$$\varphi_0 = -c_1 N^0 + c_2 n N^+ + c_3 (N - N^0 - N^+) - c_4 N^0;$$

$$\begin{aligned} \varphi_+ = & c_1 N^0 - c_2 n N^+ + c_1^* (N - N^0 - N^+) - \\ & - c_2^* n N^+ + s_1 (N - N^0 - N^+) p^2, \end{aligned}$$



Зависимость времени жизни токового состояния τ в кремнии КЭФ-4,5 от управляющих параметров s и s_1 при $\alpha = 2.5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $\gamma = 6.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, $c_1 = 8.8 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$, $c_1^* = 3.6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, $c_2 = c_2^* = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, $c_3 = 3.6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ и $c_4 = 9.8 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

γ , α — коэффициенты межзонной генерации и рекомбинации, c_1 , c_1^* , c_2 , c_2^* — коэффициенты выброса электрона в зону проводимости и захвата на основной и возбужденный уровень примесного центра, c_4 , c_3 — вероятности возбуждения и обратного перехода для нейтральной донорной примеси. Коэффициенты генерационно-рекомбинационных процессов в общем случае зависят от напряженности электрического поля E , особенно сильна эта зависимость для коэффициентов ударной ионизации s , s_1 и коэффициентов α , c_2 , c_2^* . В данной работе при численном моделировании исследовалось изменение состояния системы от параметров s , s_1 , α и удельного сопротивления кремния, соотношение между остальными параметрами определялось на основании принципа детального равновесия.

Система (1)–(4) с уравнением Пуассона, начальными и граничными условиями позволяет находить распределение носителей в пространстве и исследовать динамику системы.

Однородные стационарные состояния определяются из условия $\varphi_n = \varphi_p = \varphi_0 = \varphi_+ = 0$, и при

$$s < (2\alpha/3)\sqrt{\alpha/(3\gamma)}, \quad c_1^* > c_1$$

получаем два решения: состояние с малой и состояние с большой концентрацией дырок. В первом состоянии концентрация носителей мало отличается от равновесной, это состояние устойчиво. Второе состояние неустойчиво, концентрация дырок в этом состоянии мало отличается от α/s при условии, что α/s больше равновесной концентрации дырок. С увеличением s и s_1 уменьшается различие в концентрациях носителей тока в этих токовых состояниях и увеличивается время жизни неустойчивого токового состояния. На рисунке представлена зависимость времени жизни токового состояния от управляющих параметров s и s_1 . Время жизни токового состояния существенно возрастает при уменьшении концентрации донорной примеси, достигая величин порядка нескольких секунд при выбранных параметрах.

Если подвижность носителей в состоянии с малой и в состоянии с большой концентрацией носителей отличается незначительно, то должна наблюдаться вольт-амперная характеристика с отрицательной дифференциальной проводимостью. При этом малые пространственные и временные флуктуации могут нарастать и приводить к образованию пространственных структур в виде нитей тока (шнуров). Малые возмущения коэффициентов генерации и рекомбинации, вызванные подсветкой, деформацией, структурной неоднородностью образца, тепловыми флуктуациями, могут существенно повлиять на образование неоднородных структур в приповерхностной области.

Из-за образования токовых шнуров электрическое поле в слое окисла кремния на границе образец кремния-электролит будет неоднородным. Можно считать, что электрический ток в слое окисла является чисто ионным, из-за малой толщины окисной пленки диффузионной компонентой можно пренебречь [11]. Тогда естественно допустить, что окисление кремния и последующее травливание плавиковой кислотой будет происходить более интенсивно в области выхода токового шнура из кремния.

Работа выполнена при частичной поддержке Международной соросовской программы образования в области точных наук, N d1276.

Список литературы

- [1] *Cullis A.G., Canham L.T., Williams G.M., Smith P.W., Dosser O.D.* // J. Appl. Phys. 1994. V. 75. N 1. P. 493–501.
- [2] *Бучин Э.Ю., Постников А.В., Проказников А.В., Световой В.Б., Чурилов А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 1. С. 60–65.
- [3] *Smith R.L., Collins S.D.* // Journal of Applied Physics. 1992. V. 71. N 8. P. R1–R22.
- [4] *Компан М.Е., Шабанов И.Ю.* // Физика и техника полупроводников. 1995. Т. 29. В. 10. С. 1859–1869.

- [5] Zhang X.G. // Journal of Electrochem. Soc. 1991. V. 138. N 12. P. 3750-3756.
- [6] Prokaznikov A.V., Maslyenitsyn S.F., Svyatchenko A.A., Pavlov S.T. // Solid State Communication. 1994. V. 90. N 4. P. 217-221.
- [7] Lehmann V., Föll H. // Journal Electrochem. Soc. 1990. V. 137. N 2. P. 533-541.
- [8] Lehmann V. // Journal Electrochem. Soc. V. 140. N 10. P. 2836-2843.
- [9] Басс Ф.Г., Бочков В.С., Гуревич Ю.Г. Электроны и фононы в ограниченных полупроводниках. М.: Наука, 1984. 287 с.
- [10] Шёлль Э. Самоорганизация в полупроводниках. Неравновесные фазовые переходы в полупроводниках, обусловленные генерационно-рекомбинационными процессами. М.: Мир, 1991. 459 с.
- [11] Parkhutik V.P., Shershulsky V.I. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1992. V. 25. P. 1258-1263.

Ярославский
государственный
университет

Поступило в Редакцию
1 марта 1996 г.
