

Модель нестабильности *p*-МОП-транзисторов при отрицательном смещении

О.В. Александров, Н.Н. Морозов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Предложена количественная модель накопления поверхностных состояний в *p*-МОП-транзисторах при отрицательном смещении затвора. В основе модели лежит реакция освобождения под действием поля и температуры водорода из пассивированных *Pb*H-центров на межфазной границе кремния с подзатворным диэлектриком. Кинетика накопления поверхностных состояний при малых временах определяется скоростью реакции, а при больших – скоростью диффузионного оттока водорода от межфазной границы с кремниевой подложкой. Показано, что учёт дисперсионного характера переноса водорода в аморфном диэлектрике существенно замедляет процесс диффузии водорода. Промоделировано влияние напряжённости электрического поля и содержания азота в подзатворном диэлектрике.

Ключевые слова: Нестабильность МОП-структур, поверхностные состояния, дисперсионный транспорт водорода, моделирование.

1. Введение

При отрицательном смещении затвора и повышенных температурах (100-250°C) в *p*-МОП-транзисторах наблюдается накопление поверхностных состояний (ПС) и объёмного заряда. Такая отрицательная термополевая нестабильность (ОТПН) представляет серьёзную проблему для надёжности современных МОП интегральных схем (см. обзоры [1-3]).

Для описания явления в работах [4,5] была предложена реакционно-диффузионная модель (Р-Д модель), а в работах [6-8] разработан ряд её модификаций. Основой моделей являются реакции освобождения под действием электрического поля и температуры водорода с пассивированных ПС на межфазной границе (МФГ) Si-SiO₂ в виде нейтральных атомов H⁰ [6], положительно заряженных ионов (протонов) H⁺ [7] или молекул H₂ [8]. Общим недостатком этих моделей является чрезвычайно малые коэффициенты диффузии водорода в SiO₂ [2], на несколько порядков меньшие экспериментальных значений, определённых в [9,10]. Причиной такого несоответствия может быть неучёт дисперсионного характера переноса водорода в аморфном подзатворном диэлектрике.

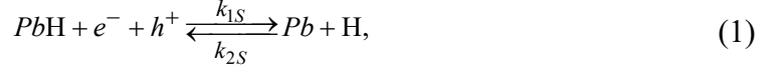
При перемещении в неупорядоченной структуре аморфного диэлектрика водород захватывается на локализованные состояния (ловушки), на которых задерживается на время, зависящее от энергии связи, лежащей в определённом диапазоне. Такой дисперсионный транспорт описывается моделью случайных блужданий с непрерывным временем (CTRW) [11] или моделью многократного захвата (МЗ) [12]. Модель МЗ физически более наглядна, чем модель CTRW и имеет более простую численную реализацию.

Целью настоящей работы является разработка количественной модели накопления поверхностных состояний в *p*-МОП-транзисторах при отрицательном смещении затвора с учётом дисперсионного характера переноса водорода в подзатворном диэлектрике.

2. Уравнения модели

При отрицательном смещении выше порогового в подзатворной области

кремниевой подложки р-МОП-транзисторов образуется инверсный р-слой. Под действием электрического поля и повышенной температуры в присутствии электронов, инжектируемых затвором, и дырок кремния на МФГ с диэлектриком происходит реакция развала PbH -центров с освобождением водорода:



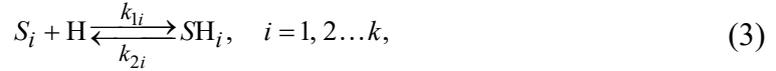
где k_{1S} и k_{2S} – константы скоростей прямой и обратной реакций.

Скорость образования ПС определяется кинетикой реакции (1):

$$\frac{\partial Q_{Pb}}{\partial t} = k_{1S} Q_{PbH} - k_{2S} Q_{Pb} C_H, \quad (2)$$

где Q_{PbH} и Q_{Pb} – плотности пассивированных PbH - и непассивированных Pb -центров (плотность ПС $Q_{it} = Q_{Pb}$, $Q_{PbH} = Q_{PbH}^0 - Q_{Pb}$), Q_{PbH}^0 – начальная плотность пассивированных PbH -центров; C_H – концентрация свободного водорода на МФГ кремния с диэлектриком.

В отличие от кристаллических тел в аморфных диэлектриках сохраняется только ближний порядок и отсутствует дальний порядок. Соответственно, имеется дисперсия энергий связи атомов водорода с локализованными состояниями. В соответствии с моделью МЗ непрерывное распределение локализованных состояний по энергиям заменяется на систему k ловушек с дискретными уровнями E_{bi} , соответствующими энергии связи атома Н с i -той ловушкой. Захват атомов водорода Н на ловушки S_i происходит согласно реакции:



где k_{1i} и k_{2i} – константы скорости прямой и обратной реакции (3).

При таком многократном захвате и освобождении водорода с k локализованных состояний в соответствии с реакцией (3) уравнения дисперсионного транспорта водорода принимают вид:

$$\frac{\partial C_H}{\partial t} = D_H \frac{\partial^2 C_H}{\partial x^2} - C_H \sum_{i=1}^k k_{1i} C_{Si} + \sum_{i=1}^k k_{2i} C_{SHi}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{SHi}}{\partial t} = -\frac{\partial C_{Si}}{\partial t} = k_{1i} C_H C_{Si} - k_{2i} C_{SHi}, \quad i = 1, 2 \dots k, \quad (5)$$

где t – время; x – координата, отсчитываемая от Si-подложки при $x = 0$ до затвора при $x = d$ (d – толщина подзатворного диэлектрика); C_{Si} и C_{SHi} – текущие концентрации i -тых ловушек и локализованных на них атомов водорода, соответственно; D_H – коэффициент диффузии водорода.

Распределение плотности локализованных состояний по энергии имеет экспоненциальный вид, характерный для некристаллических материалов [12]:

$$C_{Si}(E_{bi}) = \frac{C_S}{E_0} \exp\left(-\frac{E_{bi}}{E_0}\right), \quad i = 1, 2 \dots k, \quad (6)$$

где $C_{Si}(E_{bi})\Delta E_{bi}$ – концентрация локализованных состояний с энергиями от E_{bi} до $E_{bi} + \Delta E_{bi}$, $\Delta E_{bi} = (E_{bk} - E_{b1}) / k$; E_0 – характеристическая энергия. Энергии связи E_{bi} лежат в определенном диапазоне от E_{b1} до E_{bk} , $E_{bi} = E_{b0} + \Delta E_{bi} \cdot i$, $i = 1, 2 \dots k$. Полная концентрация локализованных состояний в этом диапазоне определяется как:

$$C_S = \sum_{i=1}^k C_{Si}(E_{bi})\Delta E_{bi}.$$

Полагаем, что в начальный момент времени все ловушки пустые и располагаются равномерно по толщине диэлектрика:

$$C_S(x,0) = C_{S0}. \quad (7)$$

Граничное условие для свободного водорода на МФГ Si-SiO₂ определяется из условия равенства диффузионного потока атомов водорода в диэлектрик и скорости его освобождения на МФГ:

$$j_H = -D_H \frac{\partial C_H}{\partial x} = k_{1S} Q_{PbH} - k_{2S} Q_{Pb} C_H, \quad (8)$$

где j_H – поток атомов водорода. Затвор является стоком для свободного водорода:

$$C_H(d,t) = 0. \quad (9)$$

Полагалось, что все ловушки захватывают атомы водорода с одинаковой скоростью: $k_{1i} = k_1 = 4\pi R_H D_H$, где R_H – радиус захвата, $R_H = 10 \text{ \AA}$, D_H – коэффициент диффузии водорода в аморфном SiO₂, $D_H = 1.0 \cdot \exp(-0.73 / k_B T)$ [10], k_B – постоянная Больцмана; T – температура. Освобождение атомов водорода с ловушек происходит со скоростью, зависящей от энергии связи иона с ловушкой E_{bi} , $k_{2i} = \nu \exp(-E_{bi} / k_B T)$, где ν – частотный фактор, $\nu = 10^{12} \text{ c}^{-1}$. При расчёте использовались следующие значения параметров: $Q_{PbH}^0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ [13]; $E_0 = 0.07 \text{ эВ}$ [14]; $C_S = 2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $E_{b1} = 0.87 \text{ эВ}$; $E_{bk} = 0.94 \text{ эВ}$ [15]. Зависимости k_{1S} и k_{2S} от напряжённости электрического поля и от содержания азота в диоксиде кремния определялась из сопоставления с экспериментальными зависимостями.

3. Результаты расчетов

Уравнения модели (4), (5) решались численно с использованием неявной и явной разностных схем с начальным условием (7), граничными условиями (8), (9) с учётом (6). Решения сравнивались с экспериментальными данными [6, 16] по кинетике изменения плотности поверхностных состояний в МОП-транзисторах при ОТПН.

На рис. 1 показано влияние электрического поля в оксиде на образование ПС при ОТПН по данным работы [16] (значки 1-4) при температуре $T = 125^\circ\text{C}$, $d = 2.6 \text{ нм}$ в сравнении с расчётом (кривые 1' - 4'). Влияние поля при расчёте учитывалось через константу k_{1S} прямой реакции (1) в виде экспоненциальной зависимости от напряжённости [17]:

$$k_{1S} = k_{1S0} \exp(BE_{ox}), \quad (10)$$

где E_{ox} – напряжённость электрического поля на МФГ Si-SiO₂, k_{1S0} – константа k_{1S} при $E_{ox} = 0$ ($k_{1S0} = 10^{-5} \text{ c}^{-1}$), B – коэффициент ($B = 1.15$ при E_{ox} в МВ/см).

Как видно из рисунка, с увеличением напряжённости электрического поля плотность ПС увеличивается. Это происходит вследствие увеличения вероятности туннелирования электронов из затвора и дырок из инверсного p -слоя кремния на МФГ Si-SiO₂ под действием поля.

На рис. 2 показаны кинетики накопления ПС при ОТПН в МОП-транзисторах с различным содержанием азота в диоксиде кремния (кр. 1-3) по данным работы [6]. Толщина оксида составляла 1.8 нм, напряжённость поля во всей МОП-структуре: $E_d = -V_G/d = 12.2 \text{ МВ/см}$ ($V_G = -2.2 \text{ В}$), температура $T = 125^\circ\text{C}$.

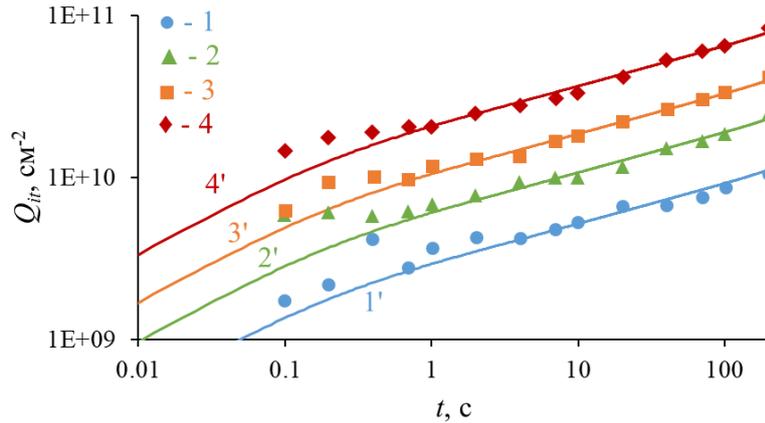


Рисунок 1. Влияние на образование ПС напряженности электрического поля в оксиде E_{ox} , МВ/см: 1,1' – 5.7; 2,2' – 6.9; 3,3' – 8.0; 4,4' – 9.1. 1 – 4 – эксперимент [16], 1' – 4' – расчёт при k_{1S} по формуле (10), $k_{2S} = 5.6 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$.

Как видно из рисунка, введение азота усиливает эффект ОТПН. Полагаем, что это происходит вследствие накопления азота на МФГ с кремнием, обнаруженного в работе [18]. Накопленный азот ослабляет взаимодействие водорода с *Pb*-центрами и тем самым снижает скорость обратной реакции (1). Влияние азота учитываем при расчёте (кривые 1'–3') через константу скорости обратной реакции (1) в виде зависимости:

$$k_{2S} = k_{2S0} / (A \cdot C_N + 1), \quad (11)$$

где C_N – атомная доля азота, $A = 55.1 \%$, k_{2S0} – константа скорости обратной реакции при $C_N = 0$.

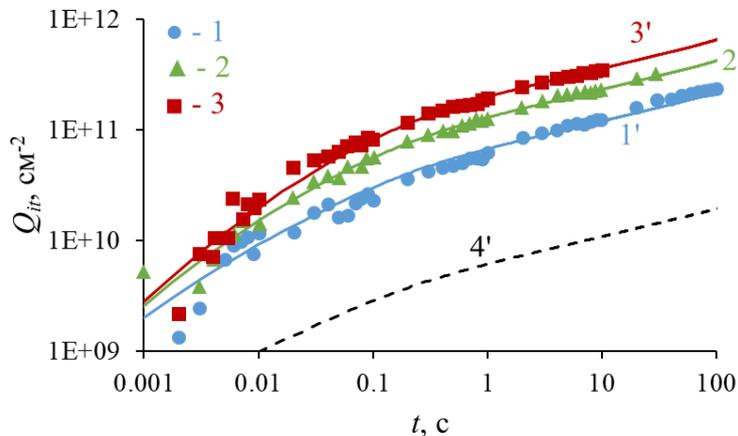


Рисунок 2. Влияние на образование ПС содержания азота в диоксиде кремния C_N , ат. %: 1, 1' – 3; 2, 2' – 8; 3, 3' – 15; 4' – 0. 1 – 3 – эксперимент [6], 1' – 4' – расчёт при k_{2S} по формуле (11), $k_{1S} = 0.03 \text{ с}^{-1}$.

4. Обсуждение результатов

Зависимости плотности ПС от времени при ОТПН (рис. 1, 2) имеют степенной вид: $Q_{it} \sim t^n$. На начальном этапе показатель $n \sim 1$, скорость образования ПС определяется скоростью освобождения водорода по прямой реакции (1) – реакционная стадия. С ростом плотности *Pb*-центров увеличивается скорость обратной реакции (1) и лимитирующей становится диффузия, показатель степени падает до $n \sim 0.25$ – диффузионная стадия. Учёт дисперсионного характера диффузии водорода в аморфном подзатворном диэлектрике приводит к существенному замедлению

диффузионного переноса при относительно высоком коэффициенте диффузии свободного водорода, равном литературному значению [10]. Таким образом, устраняется несоответствие низкого коэффициента диффузии водорода SiO₂ в моделях [6, 16] с более высокими литературными значениями [9,10].

5. Заключение

Показано, что учёт дисперсионного характера транспорта атомов водорода в подзатворном диэлектрике позволяет численно описать кинетику образования поверхностных состояний в МОП-структурах при ОТПН. При этом коэффициент диффузии свободного водорода остаётся достаточно большим и соответствует литературным значениям. На основе модели многократного захвата проведено моделирование временных зависимостей плотности ПС от напряженности электрического поля и содержания азота в подзатворном диоксиде кремния.

Список литературы

1. Zhang J. F. et al. Bias temperature instability of MOSFETs: Physical processes, models, and prediction // *Electronics*. – 2022. – Т. 11. – №. 9. – С. 1420.
2. Stathis J. H., Mahapatra S., Grasser T. Controversial issues in negative bias temperature instability // *Microelectronics Reliability*. – 2018. – Т. 81. – С. 244-251.
3. Schroder D. K., Babcock J. A. Negative bias temperature instability: Road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing // *Journal of applied Physics*. – 2003. – Т. 94. – №. 1. – С. 1-18.
4. Jeppson K. O., Svensson C. M. Negative bias stress of MOS devices at high electric fields and degradation of MNOS devices // *Journal of Applied Physics*. – 1977. – Т. 48. – №. 5. – С. 2004-2014.
5. Ogawa S., Shiono N. Generalized diffusion-reaction model for the low-field charge-buildup instability at the Si-SiO₂ interface // *Physical Review B*. – 1995. – Т. 51. – №. 7. – С. 4218.
6. Yang J. B. et al. Analytical reaction-diffusion model and the modeling of nitrogen-enhanced negative bias temperature instability // *Applied physics letters*. – 2006. – Т. 88. – №. 17.
7. Houssa M. Modelling negative bias temperature instabilities in advanced p-MOSFETs // *Microelectronics Reliability*. – 2005. – Т. 45. – №. 1. – С. 3-12.
8. Küflüoğlu H., Alam M. A. A generalized reaction-diffusion model with explicit H-H₂ dynamics for negative-bias temperature-instability (NBTI) degradation // *IEEE Trans. Electron Devices*. – 2007. – Т. 54. – №. 5. – С. 1101-1107.
9. Griscom D. L. Diffusion of radiolytic molecular hydrogen as a mechanism for the post-irradiation buildup of interface states in SiO₂-on-Si structures // *Journal of applied physics*. – 1985. – Т. 58. – №. 7. – С. 2524-2533.
10. Hofstein S. R. Proton and sodium transport in SiO₂ films // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1967. – Т. 14. – №. 11. – С. 749-759.
11. Scher H., Montroll E. W. Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids // *Physical Review B*. – 1975. – Т. 12. – №. 6. – С. 2455.
12. Noolandi J. Multiple-trapping model of anomalous transit-time dispersion in a-Se // *Physical Review B*. – 1977. – Т. 16. – №. 10. – С. 4466.
13. Gale R. et al. Hydrogen migration under avalanche injection of electrons in Si metal-oxide-semiconductor capacitors // *Journal of applied physics*. – 1983. – Т. 54. – №. 12. – С. 6938-6942.
14. Saks N. S., Brown D. B. Interface trap formation via the two-stage H⁺ process // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1989. – Т. 36. – №. 6. – С. 1848-1857.
15. Александров О. В. Дисперсионный транспорт водорода в МОП-структурах после ионизирующего облучения // *Физика и техника полупроводников*. – 2020. – Т. 54. – №. 10. – С. 1029-1033.
16. Alam M. A., Mahapatra S. A comprehensive model of PMOS NBTI degradation // *Microelectronics Reliability*. – 2005. – Т. 45. – №. 1. – С. 71-81.
17. Islam A. E. et al. Recent issues in negative-bias temperature instability: Initial degradation, field dependence of interface trap generation, hole trapping effects, and relaxation // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2007. – Т. 54. – №. 9. – С. 2143-2154.
18. Tan S. S. et al. Relationship between interfacial nitrogen concentration and activation energies of fixed-charge trapping and interface state generation under bias-temperature stress condition // *Applied physics letters*. – 2003. – Т. 82. – №. 2. – С. 269-271.