

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-КВАНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

¹Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» Белорусского государственного университета.

²Институт математики НАН Беларуси.

Минск, Республика Беларусь. yuvchenko@bsu.by

С использованием модели пространственно-временной эволюции заряда, возникающего в подзатворном оксиде МОП-транзистора при воздействии ионизирующего излучения, проведено численное моделирование радиационно-индуцированного изменения порогового напряжения МОП-транзисторов с различной толщиной подзатворного диэлектрика. Представлены результаты моделирования ВАХ n-МОП-транзисторов, облучаемых гамма-квантами.

Повышение требований к долговечности радиоэлектронной аппаратуры специального назначения ставит актуальную задачу обеспечения функционирования интегральных микросхем (ИМС) при длительном воздействии ионизирующих излучений в реальных условиях эксплуатации на объектах атомной энергетики, а также космических летательных аппаратах. Изучение влияния проникающей радиации на характеристики МОП-транзисторов и комбинированных МОП интегральных схем (КМОП ИС), в том числе методом математического моделирования, является важной задачей.

Воздействие ионизирующей радиации на МОП-структуры приводит к заметному изменению их электрофизических характеристик, что, в основном, обусловлено образованием центров захвата и накоплением пространственного заряда в подзатворном диэлектрике, возрастанием плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник, а также уменьшением подвижности носителей заряда в приповерхностной области полупроводника [1].

Для описания процессов накопления радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике МОП-структур (SiO_2) и последующей его релаксации используем модель, в соответствии с которой в запрещенной зоне диэлектрика располагаются ловушечные уровни двух энергий – “мелкий”, расположенный вблизи потолка валентной зоны, и “глубокий”, расположенный вблизи середины запрещенной зоны. Заряд, накопленный на “мелких” ловушках, может отжигаться в рабочем диапазоне температур за счет электронов из валентной зоны SiO_2 . Заряд на “глубоких” ловушках в середине запрещенной зоны, практически не отжигается вплоть до максимальных значений неразрушающих температур.

Ловушки, соответствующие “глубокому” уровню, расположены в объеме диэлектрика, соответствующие “мелкому” уровню – в переходных слоях вблизи границы с полупроводником и поликремниевым затвором. В процессе воздействия радиации в диэлектрике МДП-структуры происходит генерация электронно-дырочных пар, разделение этих пар внешним электрическим полем, уход более подвижных носителей – электронов из слоя SiO_2 в электроды и захват дырок на ловушечные центры в диэлектрике.

Пространственно-временная эволюция заряда, возникающего в диэлектрике МДП-структуры при воздействии на нее ионизирующего излучения, в рамках данной модели описывается системой уравнений [2]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial (n \cdot E)}{\partial x} - n Q_1(E, P_{t1}, P_{t2}) + G(E), \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \mu_p \frac{\partial (p \cdot E)}{\partial x} - p Q_2(E, P_{t1}, P_{t2}) + G(E), \quad (2)$$

$$\frac{\Phi}{\epsilon_0} = \frac{Q_{0t}}{C_{ox}} + \frac{Q_{sc}(\psi)}{C_{ox}} + \frac{Q_{ss}(\psi)}{C_{ox}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_t}{\partial t} = -P_t S_3(E), \quad (4)$$

Туннельный механизм разрядки накопленного в диэлектрике заряда

$$\frac{\partial P_t}{\partial t} = -P_t S_3(E). \quad (5)$$

Распределение потенциала в р-МОП транзисторе определяется уравнением электронейтральности

$$-V_G + \phi_{ms} + \psi - \left(\frac{Q_{0t}}{C_{ox}} + \frac{Q_{sc}(\psi)}{C_{ox}} + \frac{Q_{ss}(\psi)}{C_{ox}} \right) = 0, \quad (6)$$

где

$$Q_2(E, P_{t1}, P_{t2}) = (N_{t1} - P_{t1} + N_{t2} - P_{t2}) \sigma_p(E) \left(\mu_p |E| + \frac{\mu_p}{\mu_n} v_{th} \right),$$

$$S_1(p, n, E) = p \sigma_p(E) \left(\mu_p |E| + \frac{\mu_p}{\mu_n} v_{th} \right) + n \sigma_n(\mu_n |E| + v_{th}),$$

$$S_3(E) = \alpha_1(E) \exp(-\alpha_2 x).$$

Здесь n, p – концентрации свободных электронов и дырок; E – напряженность электрического поля в диэлектрике; $P_{t1,2}$ – концентрации дырочного заряда, захваченного на ловушках, соответственно «мелких» и «глубоких»; $N_{t1,2}$ – концентрации ловушечных уровней; D_n, D_p – коэффициенты диффузии, μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок, соответственно; G – темп генерации излучением электронно-дырочных пар; q – заряд электрона; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; V_G – напряжение на затворе МОП-транзистора; ϕ_{ms} – разность работ выхода материала затвора и полупроводника; ψ – поверхностный потенциал полупроводника, Q_{0t} – эффективный заряд в диэлектрике, захваченный на ловушечных уровнях; Q_{cs} – заряд области пространственного заряда полупроводника; Q_{ss} – заряд на поверхностных состояниях; C_{ox} – емкость слоя диэлектрика; α_1, α_2 – частотный и барьерный факторы; σ_n, σ_p – полевые зависимости сечения захвата дырки и электрона; v_{th} – тепловая скорость носителей заряда.

Зависимости $\sigma_n(E), \sigma_p(E), G(E)$, а также выражения для вычисления зарядов $Q_{0t}, Q_{cs}(\psi), Q_{ss}(\psi)$ приведены в работе [3]. Использовался следующий вид распределения по толщине диэлектрика «мелких» N_{t1} и «глубоких» N_{t2} ловушечных уровней [2]:

$$N_{t1} = 5 \times 10^{18} \left(\left(e^{(x-20)} + 1 \right)^{-1} + \left(e^{(80-x)} + 1 \right)^{-1} \right), \quad N_{t2} = 5 \times 10^{18} \left(\left(e^{(x-90)} + 1 \right)^{-1} - \left(e^{(x-10)} + 1 \right)^{-1} \right).$$

Для решения задачи использовались разработанные авторами итерационный алгоритм и разностная схема, описанные в [3]. При расчётах использовались следующие значения: мощность радиационной дозы $\dot{D} = dD / dt = 10^2$ Р/с, концентрация легирующей примеси в кремнии $N_B = 10^{15}$ см⁻³, температура $T = 300$ К, $V_G = -0,9$ В, $\phi_{ms} = -0,5$ В, $\mu_n = 10^2$ см²В⁻¹с⁻¹, $\mu_p = 0,6 \cdot 10^{-3}$ см²В⁻¹с⁻¹. Коэффициент генерации электронно-дырочных пар рентгеновским излучением в SiO₂ $k_g = 8 \times 10^{12}$ см⁻³рад⁻¹ пар, $\epsilon_{ox} = 1,6$, $\epsilon_s = 11,5$, $k_D = 1,012$.

На рисунке 1 представлено рассчитанное изменение порогового напряжения р-МОП транзистора в процессе облучения гамма-квантами, для различных толщин подзатворного

диэлектрика t_{ox} .

На рисунке 2 представлены результаты моделирования сток-затворной ВАХ n-МОП транзистора классической геометрии с длиной и шириной канала 0,35 мкм и 10 мкм, соответственно, облученного гамма-квантами с дозой до 1×10^7 рад [4]. Наилучшее соответствие с экспериментальными результатами дает приближение короткоканального транзистора, при котором ток стока в области насыщения определяется как [5]:

$$I_{DSAT} = k_{ym} Z C_{ox} \left(V_G - V_{th} - \frac{n}{2} V_D \right) v_{SAT}, \quad n = 1 + \left\langle \frac{\partial V_{th}}{\partial V_{SB}} \right\rangle, \quad (7)$$

где Z – ширина канала, V_{th} – пороговое напряжение, v_{SAT} – скорость насыщения носителей в канале, n – коэффициент влияния подложки. Здесь мы ввели k_{ym} – коэффициент, связанный с токами утечки.

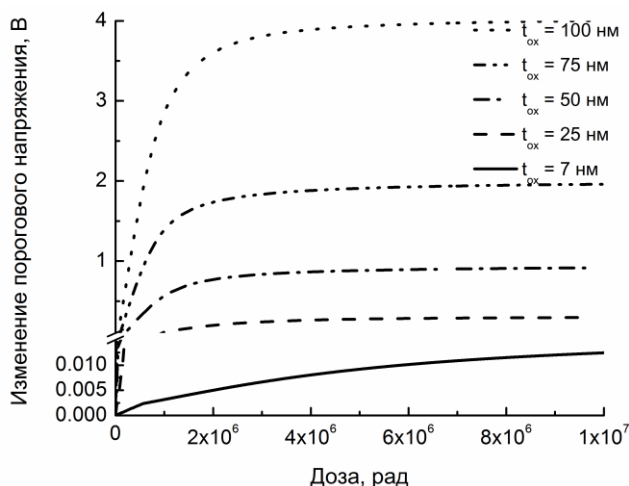


Рисунок 1 – Рассчитанная зависимость изменения порогового напряжения p-МОПТ от дозы облучения для различных толщин подзатворного диэлектрика.

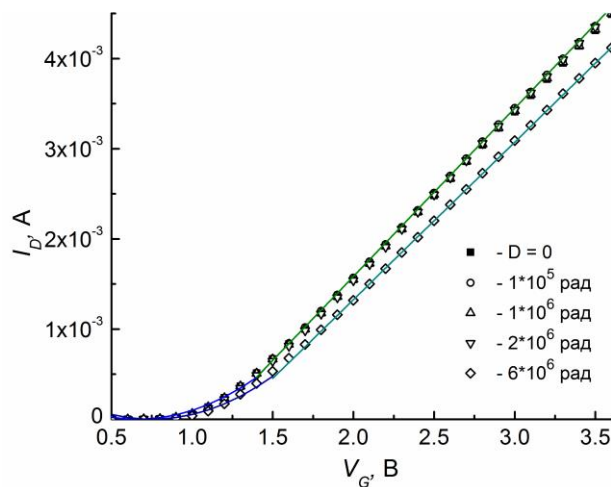


Рисунок 2 – Влияние облучения гамма-квантами на сток-затворную ВАХ n-МОПТ классической геометрии с $t_{ox} = 7$ нм.

Наилучшее соответствие с экспериментальными результатами получено при использовании следующих значений: $n = 0,27$; $k_{ym} = 0,63$ для ВАХ транзисторов, облученных с дозами до 2×10^6 рад. При облучении с дозой 6×10^6 рад происходит некоторый сдвиг и искажение ВАХ; для моделирования использованы значения $n = 0,32$; $k_{ym} = 0,59$.

Список литературы

1. Коршунов, Ф. П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы / Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, В.А. Вавилов. – Минск : Наука и техника, 1986. – 254 с.
2. Моделирование процессов рентгеновской коррективки пороговых напряжений МДП-интегральных схем / М.Н. Левин [и др.] // Микроэлектроника. – 2006. – Т. 35, № 5. – С. 382–391.
3. Заяц, Г.М.. Численное исследование влияния радиационных излучений на параметры МДП-приборов / Г.М Заяц, Ф.Ф. Комаров, А.Ф. Комаров // Информатика. – 2014. – № 3. – С. 52–61.
4. Радиационные эффекты в элементах субмикронных КМОП интегральных схем / Ф.П. Коршунов [и др.] // Доклады БГУИР. – 2011. – Т. 58, № 4. – С. 43–48.
5. Парменов, Ю. А. Элементы твердотельной наноэлектроники / Ю. А. Парменов. – М. : МИЭТ, 2011. – 131 с.