

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
"Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники"

Кафедра микроэлектроники

**И.И. Абрамов**

## **Моделирование МОП-структур**

Учебно-методическое пособие к лабораторным работам  
по дисциплине

«Моделирование технологических процессов и  
элементов интегральных схем»  
для студентов специальности

41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы»  
дневной формы обучения

Минск 2004

УДК 621.382 (075.8)  
ББК 32.85 я 73  
А 16

**Абрамов И.И.**

А 16      Моделирование МОП-структур: Учебно-метод. пособие к лаб. работам по дисц. «Моделирование технологических процессов и элементов интегральных схем» для студ. спец. 41 01 02 Микро- и наноэлектронные технологии и системы дневн. формы обуч./ И.И. Абрамов. – Мн.: БГУИР, 2004. – 22 с.: ил.  
ISBN 985-444-714-6

В учебно-методическом пособии приведены описание двумерной численной модели и задания к циклу лабораторных работ по моделированию МОП-структур.

Пособие предназначено для студентов старших курсов специальностей, связанных с микроэлектроникой, а также может быть полезно аспирантам и инженерам, использующим модели элементов интегральных микросхем в своих исследованиях.

**УДК 621.382 (075.8)**  
**ББК 32.85 я 73**

ISBN 985-444-714-6

© Абрамов И.И., 2004  
© БГУИР, 2004

## Содержание

Двумерная численная модель МОП-транзистора

Задания к лабораторным работам

Лабораторная работа №1 «Моделирование идеальной МОП-структуры»

Лабораторная работа №2 «Моделирование выходных характеристик МОП-транзистора с коротким каналом»

Лабораторная работа №3 «Моделирование передаточных характеристик МОП-транзистора с коротким каналом в подпороговой области»

Лабораторная работа №4 «Моделирование выходных характеристик МОП-транзистора с длинным каналом»

Лабораторная работа №5 «Моделирование влияния концентрации примеси в подложке на выходные характеристики МОП-транзистора с коротким каналом»

Лабораторная работа №6 «Моделирование влияния ударной ионизации и эффектов сильного легирования на выходные характеристики МОП-транзистора с коротким каналом»

Лабораторная работа №7 «Исследование влияния точности моделирования на передаточные характеристики МОП-транзистора с коротким каналом»

Литература

## Двумерная численная модель МОП- транзистора

Диффузионно-дрейфовая модель (ДДМ) МОП-транзистора основывается на фундаментальной системе уравнений (ФСУ) физики полупроводников, а именно:

$$\partial n / \partial t = \nabla \vec{J}_n / q - R; \quad (1)$$

$$\partial p / \partial t = -\nabla \vec{J}_p / q - R; \quad (2)$$

$$-\nabla \varepsilon \nabla \varphi = q(p - n + N_D^+ - N_A^-); \quad (3)$$

$$\vec{J}_n = -qn\mu_n \nabla (\varphi + A\Delta \tilde{V}_g) + q\varphi_T \mu_n \nabla n; \quad (4)$$

$$\vec{J}_p = -qp\mu_p \nabla [\varphi - (1-A)\Delta \tilde{V}_g] - q\varphi_T \mu_p \nabla p, \quad (5)$$

где в случае учета эффектов сильного легирования (ЭСЛ)

$$n = n_{i0} \exp\left(A\Delta \tilde{V}_g / \varphi_T\right) \exp\left[(\varphi - \varphi_n) / \varphi_T\right]; \quad (6)$$

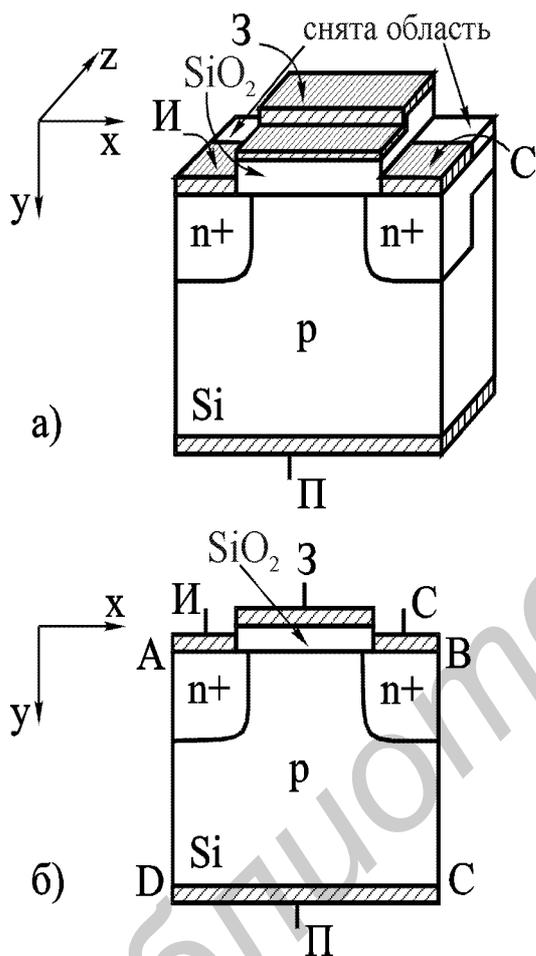
$$p = n_{i0} \exp\left[(1-A)\Delta \tilde{V}_g / \varphi_T\right] \exp\left[(\varphi_p - \varphi) / \varphi_T\right]. \quad (7)$$

Здесь (1), (2) – уравнения непрерывности электронов и дырок, (3) – уравнение Пуассона, (4), (5) – уравнения переноса для плотностей токов электронов и дырок.

В (1) – (7) введены следующие обозначения:  $n, p$  – концентрации подвижных или свободных электронов и дырок;  $t$  – время;  $\vec{J}_n, \vec{J}_p$  – векторы плотности токов электронов и дырок;  $q$  – заряд электрона;  $R$  – превышение скорости рекомбинации над скоростью генерации;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала;  $\varphi$  – электростатический потенциал;  $N_D^+, N_A^-$  – концентрации ионизированных доноров и акцепторов;  $\mu_n, \mu_p$  – подвижности электронов и дырок;  $\varphi_T$  – температурный потенциал, равный  $k_B T / q$ , здесь  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура;  $n_{i0}$  – собственная концентрация;

$\phi_n, \phi_p$  – квазиуровни Ферми электронов и дырок, выраженные в вольтах;  $A$  и  $\Delta \tilde{V}_g$  – эффективные параметры, описывающие совместное влияние эффектов сильного легирования.

Представление структуры МОП-транзистора в трехмерном и двумерном случаях показано на рисунке, а, б.



При этом в ДДМ в рассматриваемом нами двумерном случае оператор  $\nabla$  в (1) – (5) имеет вид

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j},$$

где  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  – единичные векторы вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Представление структуры МОП-транзистора:  
а) трехмерный случай; б) двумерный случай.  
Контакты: И – исток; З – затвор; С – сток;  
П – подложка

Рассмотрим стационарный случай, т.е.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} = 0.$$

Граничные условия. Часто при двумерном моделировании используются следующие граничные условия.

1. На свободных поверхностях AD и BC (см. рисунок, б) справедливы условия

$$\vec{n}_S \nabla \phi_n = 0, \tag{8}$$

$$\vec{n}_S \nabla \phi_p = 0, \quad (9)$$

$$\vec{n}_S \nabla \varphi = 0, \quad (10)$$

где  $\vec{n}_S$  – нормаль к поверхности. Соотношения (8) – (10) следуют из предположения, что нормальная составляющая плотности полного тока  $\vec{J}_{полн}$  через поверхность, не покрытую контактом, равна нулю.

2. На омических контактах к полупроводнику (И,С,П) предполагается неограниченная скорость поверхностной рекомбинации, что дает

$$n = n_0; \quad p = p_0; \quad (11)$$

$$n_0 p_0 = n_{ie}^2 = \left[ n_{i0} \exp \left( \Delta \tilde{V}_g / 2\phi_T \right) \right]^2, \quad (12)$$

где  $n_0, p_0$  – равновесные концентрации;  $n_{ie}$  – эффективная собственная концентрация. Допускается нейтральность объемного заряда

$$q (p - n + N_D^+ - N_A^-) = 0. \quad (13)$$

3. На границе раздела полупроводник-диэлектрик справедливы соотношения

$$\vec{n}_S \vec{J}_n = 0, \quad \vec{n}_S \vec{J}_p = 0; \quad (14)$$

$$\vec{n}_S \varepsilon_1 \vec{E}_1 - \vec{n}_S \varepsilon_2 \vec{E}_2 = -\sigma_{нов}, \quad (15)$$

где индексы 1, 2 обозначают номера областей;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля ( $\vec{E} = -\nabla \varphi$ );  $\sigma_{нов}$  – плотность поверхностного заряда.

Соотношение (14) следует из предположений, что нормальная составляющая плотности полного тока  $\vec{J}_{полн}$  через границу Si-SiO<sub>2</sub> равна нулю и что отсутствует поверхностная рекомбинация-генерация  $R_s = 0$  (так же, как и в п.1). Уравнение (15) – закон Гаусса-Остроградского. Традиционно полагается, что

$$\sigma_{нов} = 0. \quad (16)$$

4. Выходной ток определяется интегралом по площади омического контакта  $S_K$  плотности полного тока

$$I_{\text{ом.к.}} = \int_{S_K} \vec{n}_S \vec{J}_{\text{полн}} ds. \quad (17)$$

Предположения. Часто подзатворный диэлектрик предполагается достаточно тонким, так что в нем не решается уравнение Пуассона, а распределение потенциала считается линейным. Наличием зарядов в  $\text{SiO}_2$  пренебрегают. В результате введения этих предположений решать уравнения вида (1) – (5) в диэлектрике не надо.

Модели. При моделировании МОП-транзисторов используется, вообще говоря, широкий ассортимент моделей процессов рекомбинации-генерации и моделей подвижностей. Однако обычно привлекаются следующие модели.

Для описания процессов рекомбинации-генерации используются модели Шокли-Рида-Холла  $R_{\text{Ш-Р-Х}}$ , рекомбинации Оже  $R_O$  и скорости генерации вследствие ударной ионизации

$$R_{\text{Ш-Р-Х}} = \frac{p n - n_{ie}^2}{\tau_p (n + n_{ie}) + \tau_n (p + n_{ie})}; \quad (18)$$

$$R_O = (p n - n_{ie}^2) (c_n n + c_p p); \quad (19)$$

$$G_{\text{Л}} = \alpha_n \left| \vec{J}_n \right| + \alpha_p \left| \vec{J}_p \right|, \quad (20)$$

где  $\tau_n, \tau_p$  – времена жизни электронов и дырок;  $c_n, c_p$  – коэффициенты рекомбинации Оже;  $G_{\text{Л}}$  – скорость генерации вследствие ударной ионизации;  $\alpha_n, \alpha_p$  – коэффициенты ударной ионизации, описываемые моделью Чиновета.

Суммарная скорость рекомбинации-генерации имеет вид

$$R = R_{\text{Ш-Р-Х}} + R_O - G_{\text{Л}}. \quad (21)$$

Электрофизические параметры  $\tau_n, \tau_p, c_n, c_p, \alpha_n, \alpha_p$  задаются исходя из экспериментальных данных.

Для подвижностей используется эмпирическая модель Ямагучи вида:

$$\mu(N_T, E_{\parallel}, E_{\perp}) = \mu(N_T, E_{\perp}) f_{\parallel}(N_T, E_{\perp}, E_{\parallel}); \quad (22)$$

$$\mu(N_T, E_{\perp}) = \mu(N_T) (1 + \alpha_{\parallel}^* E_{\perp})^{-1/2};$$

$$\mu(N_T) = \frac{\mu_0}{\sqrt{1 + \left[ N_T / (N_T / S + N_{ref}) \right]}};$$

$$f_{\parallel}(N_T, E_{\perp}, E_{\parallel}) = \left[ 1 + \left( \frac{\mu(N_T, E_{\perp}) E_{\parallel}}{v_C} \right)^2 \left( F + \frac{\mu(N_T, E_{\perp}) E_{\parallel}}{v_C} \right)^{-1} + \left( \frac{\mu(N_T, E_{\perp}) E_{\parallel}}{v_S} \right)^2 \right]^{-1/2},$$

где  $N_T = N_D^+ + N_A^-$ , а  $\mu_0$ ,  $\alpha_{\parallel}^*$ ,  $v_C$ ,  $v_S$ ,  $S$ ,  $F$ ,  $N_{ref}$  – параметры, которые задаются исходя из экспериментальных данных. Важной особенностью модели Ямагучи является учет в ней зависимостей подвижностей от продольного  $E_{\parallel}$  и поперечного  $E_{\perp}$  полей инверсионных слоев

$$E_{\parallel} = \left( \vec{E} \vec{J}_{nров} \right) / \left| \vec{J}_{nров} \right|, \quad E_{\perp} = \left| \vec{E} \times \vec{J}_{nров} \right| / \left| \vec{J}_{nров} \right|, \quad (23)$$

где  $\vec{J}_{nров}$  – ток проводимости ( $\vec{J}_{nров} = \vec{J}_n + \vec{J}_p$ ), который равен  $\vec{J}_{полн}$  в стационарном случае.

Для описания ЭСЛ традиционно используется эмпирическая модель Слотбума – де Грааффа

$$\Delta \tilde{V}_g = V_C \left[ \ln(N_T / N_0) + \sqrt{\ln^2(N_T / N_0) + A_0} \right], \quad (24)$$

где  $N_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $V_C = 9 \text{ мВ}$ ;  $A_0 = 0,5$ . Причем  $A$  любое в диапазоне  $[0, 1]$ .

Традиционно полагается  $A = 0,5$ .

Переход к дискретной модели. Таким образом, исходная непрерывная ДДМ является системой дифференциальных уравнений в частных производных (1) – (5) со вспомогательными соотношениями (6) – (24). При численном моделировании на предварительном этапе осуществляется переход к дискретной

модели. Для этих целей элемент покрывается сеткой пространственной дискретизации, а переменные заменяются значениями в узлах сетки пространственной дискретизации. После этого производные в ДДМ заменяются аппроксимирующими выражениями по методу конечных разностей. В результате исходная непрерывная ДДМ сводится к дискретной модели, которая уже состоит из систем нелинейных алгебраических уравнений в стационарном случае ( $\partial p / \partial t = \partial n / \partial t = 0$ ).

Реализация дискретной модели. После этапа построения дискретной модели следует этап ее реализации. Для этих целей используются два итерационных подхода: одновременный и последовательный. При одновременном подходе получаемые системы нелинейных алгебраических уравнений дискретной модели решаются одновременно. Основным методом здесь является метод Ньютона. В последовательном подходе получаемые системы нелинейных алгебраических уравнений дискретной модели решаются последовательно. Основным методом здесь является метод Гуммеля.

На каждом шаге итерационного решения с помощью методов Гуммеля и Ньютона возникают системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для решения СЛАУ используются известные численные методы: Гаусса, последовательной верхней релаксации, Булеева, Стоуна и др. Таким образом, при реализации дискретной модели используются два итерационных процесса, а именно: внешний (Гуммеля или Ньютона) и внутренний (решение СЛАУ).

Краткая характеристика программы SIMOS. SIMOS предназначена для реализации двумерной ДДМ, описанной выше, в стационарном случае. Минимальный объем памяти 150 Кбайт. Расчет одной точки ВАХ в среднем занимает 1-10 мин для IBM PC/AT в зависимости от требуемой точности и режима работы транзистора. При построении дискретной модели используется метод конечных разностей. При реализации дискретной модели используется последовательный метод Гуммеля.

Литература: [1] – [6].

## Задания к лабораторным работам

### Лабораторная работа №1 «Моделирование идеальной МОП-структуры»

Цель работы: исследовать характерные особенности распределений  $\varphi, n, p$  при различных смещениях на затворе МОП-транзистора.

Основные исходные данные о структуре: Толщина окисла – 0,03 мкм; длина прибора – 2 мкм; координата левого края затвора – 0,4 мкм; координата правого края затвора – 1,6 мкм; ширина прибора – 1 мкм; глубина прибора – 3 мкм; максимальная концентрация в истоке, стоке  $N_{D\max}^+ = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ; концентрация в подложке  $N_A^- = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Avalanche = 0,

Doping = 1.

VGin – начальное напряжение на затворе; VGstep – шаг изменения напряжения на затворе; VGfin – конечное напряжение на затворе; VD – постоянное напряжение на стоке.

Варианты заданий:

1. Рассчитать  $\varphi, n, p$  для:

VGin = 0В; VGstep = 1В; VGfin = 12В; VD = 0В

(accuracy = 1).

2. Рассчитать  $\varphi, n, p$  для:

VGin = 0В; VGstep = 2В; VGfin = 12В; VD = 0В

(accuracy = 3).

3. Рассчитать  $\varphi, n, p$  для:

VGin = 0В; VGstep = 10В; VGfin = 20В; VD = 0В

(accuracy = 3).

Литература: [1 - 4].

## Лабораторная работа №2 «Моделирование выходных характеристик МОП-транзистора с коротким каналом»

Цель работы: а) рассчитать выходные (стоковые) ВАХ МОП-транзистора с коротким каналом; б) показать и объяснить характерные особенности распределений  $\varphi, n$ .

Основные исходные данные о структуре те же, что и в лабораторной работе №1.

Avalanche = 0,

Doping = 1.

$V_G$  – постоянное напряжение на затворе;  $V_{Din}$  – начальное напряжение на стоке;  $V_{Dstep}$  – шаг изменения напряжения на стоке;  $V_{Dfin}$  – конечное напряжение на стоке.

Задания:

№1:

а)  $V_G = 0,5B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 10B$ ;

б)  $V_G = 5,25B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 2B$ ;  $V_{Dfin} = 12B$ ;

в)  $V_G = 3,0B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 3B$ ;  $V_{Dfin} = 12B$ ;

№2:

а)  $V_G = 1 B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 10B$ ;

б)  $V_G = 4,75B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 2B$ ;  $V_{Dfin} = 12B$ ;

в)  $V_G = 3,25B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 3B$ ;  $V_{Dfin} = 12B$ ;

№3:

а)  $V_G = 0,75 B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 10B$ ;

б)  $V_G = 5,0B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 2B$ ;  $V_{Dfin} = 12B$ ;

в)  $V_G = 2,75B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 3B$ ;  $V_{Dfin} = 12B$ ;

№4:

а)  $V_G = 0,5B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1,25B$ ;  $V_{Dfin} = 12,5B$ ;

б)  $V_G = 5,25B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 2,5B$ ;  $V_{Dfin} = 12,5B$ ;

в)  $V_G = 3,0B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 2,5B$ ;  $V_{Dfin} = 12,5B$ ;

№5:

- а)  $V_G = 1 \text{ В}; V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dstep} = 1,25\text{В}; V_{Dfin} = 12,5\text{В};$
- б)  $V_G = 4,75\text{В}; V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dstep} = 2,5\text{В}; V_{Dfin} = 12,5\text{В};$
- в)  $V_G = 3,25\text{В}; V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dstep} = 2,5\text{В}; V_{Dfin} = 12,5\text{В};$

№6:

- а)  $V_G = 0,75 \text{ В}; V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dstep} = 1,25\text{В}; V_{Dfin} = 12,5\text{В};$
- б)  $V_G = 5,0\text{В}; V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dstep} = 2,5\text{В}; V_{Dfin} = 12,5\text{В};$
- в)  $V_G = 2,75\text{В}; V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dstep} = 2,5\text{В}; V_{Dfin} = 12,5\text{В}.$

Литература: [1 - 4].

### **Лабораторная работа №3 «Моделирование передаточных характеристик МОП-транзистора с коротким каналом в подпороговой области»**

Цель работы: а) рассчитать передаточные (сток-затворные) ВАХ МОП-транзистора с коротким каналом; б) установить основные особенности распределений  $\phi, n$ ; в) определить пороговое напряжение.

Основные исходные данные о структуре те же, что и в лабораторной работе №1.

Avalanche = 0,

Doping = 1,

Accuracy = 3.

$V_{Gin}$  – начальное напряжение на затворе;  $V_{Gstep}$  – шаг изменения напряжения на затворе;  $V_{Gfin}$  – конечное напряжение на затворе;  $V_D$  – постоянное напряжение на стоке.

Задания:

№1:

- а)  $V_{Gin} = -0,5\text{В}; V_{Gstep} = 0,2\text{В}; V_{Gfin} = 2,1\text{В}; V_D = 0,1\text{В};$
- б)  $V_{Gin} = -0,5\text{В}; V_{Gstep} = 0,1\text{В}; V_{Gfin} = 0,7\text{В}; V_D = 0,5\text{В};$

в)  $V_{Gin} = -0,5B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 0,9B$ ;  $V_D = 3B$ ;

№2:

а)  $V_{Gin} = -0,6B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 2,0B$ ;  $V_D = 0,1B$ ;

б)  $V_{Gin} = -0,45B$ ;  $V_{Gstep} = 0,1B$ ;  $V_{Gfin} = 0,65B$ ;  $V_D = 0,5B$ ;

в)  $V_{Gin} = -0,6B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 0,8B$ ;  $V_D = 3B$ ;

№3:

а)  $V_{Gin} = -0,5B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 2,1B$ ;  $V_D = 0,2B$ ;

б)  $V_{Gin} = -0,5B$ ;  $V_{Gstep} = 0,1B$ ;  $V_{Gfin} = 0,7B$ ;  $V_D = 0,7B$ ;

в)  $V_{Gin} = -0,5B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 0,9B$ ;  $V_D = 2,5B$ ;

№4:

а)  $V_{Gin} = -0,6B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 2,0B$ ;  $V_D = 0,2B$ ;

б)  $V_{Gin} = -0,45B$ ;  $V_{Gstep} = 0,1B$ ;  $V_{Gfin} = 0,65B$ ;  $V_D = 0,6B$ ;

в)  $V_{Gin} = -0,6B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 0,8B$ ;  $V_D = 2,5B$ ;

№5:

а)  $V_{Gin} = -0,5B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 2,1B$ ;  $V_D = 0,15B$ ;

б)  $V_{Gin} = -0,5B$ ;  $V_{Gstep} = 0,1B$ ;  $V_{Gfin} = 0,7B$ ;  $V_D = 0,6B$ ;

в)  $V_{Gin} = -0,5B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 0,9B$ ;  $V_D = 2,0B$ ;

№6:

а)  $V_{Gin} = -0,6B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 2,0B$ ;  $V_D = 0,15B$ ;

б)  $V_{Gin} = -0,45B$ ;  $V_{Gstep} = 0,1B$ ;  $V_{Gfin} = 0,65B$ ;  $V_D = 0,7B$ ;

в)  $V_{Gin} = -0,6B$ ;  $V_{Gstep} = 0,2B$ ;  $V_{Gfin} = 0,8B$ ;  $V_D = 2,0B$ .

Литература: [1 - 4].

#### **Лабораторная работа №4 «Моделирование выходных характеристик МОП-транзистора с длинным каналом»**

Цель работы: а) рассчитать выходные (стоковые) ВАХ МОП-транзистора с длинным каналом; б) показать и объяснить основные характерные особенности распределений  $\varphi, n$ .

Замена в старых исходных данных о структуре (короткий канал):

$$XL = 0.20000+01$$

$$XG1 = 0.04000+01$$

$$XG6 = 0.16000+01$$

$$XG2 = 0.16000+01$$

$$XG3 = 0.15000+01$$

$$XG4 = 0.13000+01$$

$$XG5 = 0.65000+01$$

$$ADX = 0.06$$

$$DN1 = 0.$$

$$AN1 = 0.20000+07$$

Новые исходные данные о структуре (длинный канал):

$$XL = 0.20000+02$$

$$XG1 = 0.20000+01$$

$$XG6 = 0.18000+02$$

$$XG2 = 0.18000+02$$

$$XG3 = 0.15000+02$$

$$XG4 = 0.13000+02$$

$$XG5 = 0.65000+02$$

$$ADX = 0.6$$

$$DN1 = 0.$$

$$AN1 = 0.$$

$$Avalanche = 0,$$

$$Doping = 1,$$

$$Accuracy = 2.$$

$V_G$  – постоянное напряжение на затворе;  $V_{Din}$  – начальное напряжение на стоке;  $V_{Dstep}$  – шаг изменения напряжения на стоке;  $V_{Dfin}$  – конечное напряжение на стоке.

Задания:

№1:

a)  $V_G = 0,5B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

б)  $V_G = 1,25B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

№2:

а)  $V_G = 0,55B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

б)  $V_G = 1,20B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

№3:

а)  $V_G = 0,6B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

б)  $V_G = 1,15B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

№4:

а)  $V_G = 0,65B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

б)  $V_G = 1,10B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

№5:

а)  $V_G = 0,7B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

б)  $V_G = 1,05B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

№6:

а)  $V_G = 0,75B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ ;

б)  $V_G = 1,00B$ ;  $V_{Din} = 0B$ ;  $V_{Dstep} = 1B$ ;  $V_{Dfin} = 15B$ .

Литература: [1 - 4].

**После окончания работы установить первоначальные исходные данные о структуре (короткий канал).**

### **Лабораторная работа №5 «Моделирование влияния концентрации примеси в подложке на выходные характеристики МОП-транзистора с коротким каналом»**

Цель работы: а) оптимизировать технологический процесс, в частности выбрать требуемую по заданию концентрацию примеси в подложке; б) объяснить установленные закономерности.

Старые исходные данные о структуре:

$AN1 = 0.20000+07$

$$AN = 0.10000+06$$

Новые исходные данные о структуре:

$$AN1 = 0.$$

$$\text{Вариант 1: } AN = 0.10000+06$$

$$\text{Вариант 2: } AN = 0.10000+07$$

$$\text{Вариант 3: } AN = 0.10000+08$$

$$\text{Avalanche} = 0,$$

$$\text{Doping} = 1.$$

$V_G$  – постоянное напряжение на затворе;  $V_{Din}$  – начальное напряжение на стоке;  $V_{Dstep}$  – шаг изменения напряжения на стоке;  $V_{Dfin}$  – конечное напряжение на стоке.

Задания:

№1:

а) определить  $AN$ , соответствующую минимальному току стока в режиме насыщения;

$$\text{б) } V_G = 2,9\text{В}; V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dstep} = 1\text{В}; \dots$$

в) рассчитать ВАХ МОП-транзистора при требуемой  $AN$  в диапазоне  $V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dfin} = 15\text{В}; \text{Accuracy} = 2.$

№2:

а) определить  $AN$ , соответствующую среднему значению тока стока в режиме насыщения;

$$\text{б) } V_G = 2,9\text{В}; V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dstep} = 1\text{В}; \dots$$

в) рассчитать ВАХ МОП-транзистора при требуемой  $AN$  в диапазоне  $V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dfin} = 15\text{В}; \text{Accuracy} = 2.$

№3:

а) определить  $AN$ , соответствующую максимальному току стока в режиме насыщения;

$$\text{б) } V_G = 2,9\text{В}; V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dstep} = 1\text{В}; \dots$$

в) рассчитать ВАХ МОП-транзистора при требуемой  $AN$  в диапазоне  $V_{Din} = 0\text{В}; V_{Dfin} = 15\text{В}; \text{Accuracy} = 2.$

№4:

а) определить  $A_N$ , соответствующую минимальному току стока в режиме насыщения;

б)  $V_G = 3,1\text{В}$ ;  $V_{Din} = 0\text{В}$ ;  $V_{Dstep} = 1\text{В}$ ; ...

в) рассчитать ВАХ МОП-транзистора при требуемой  $A_N$  в диапазоне  $V_{Din} = 0\text{В}$ ;  $V_{Dfin} = 15\text{В}$ ; Accuracy = 2.

№5:

а) определить  $A_N$ , соответствующую среднему значению тока стока в режиме насыщения;

б)  $V_G = 3,1\text{В}$ ;  $V_{Din} = 0\text{В}$ ;  $V_{Dstep} = 1\text{В}$ ; ...

в) рассчитать ВАХ МОП-транзистора при требуемой  $A_N$  в диапазоне  $V_{Din} = 0\text{В}$ ;  $V_{Dfin} = 15\text{В}$ ; Accuracy = 2.

№6:

а) определить  $A_N$ , соответствующую максимальному току стока в режиме насыщения;

б)  $V_G = 3,1\text{В}$ ;  $V_{Din} = 0\text{В}$ ;  $V_{Dstep} = 1\text{В}$ ; ...

в) рассчитать ВАХ МОП-транзистора при требуемой  $A_N$  в диапазоне  $V_{Din} = 0\text{В}$ ;  $V_{Dfin} = 15\text{В}$ ; Accuracy = 2.

Литература: [1 - 4].

**После окончания работы установить первоначальные исходные данные о структуре.**

### **Лабораторная работа №6 «Моделирование влияния ударной ионизации и эффектов сильного легирования на выходные характеристики МОП-транзистора с коротким каналом»**

Цель работы: а) расчет ВАХ с учетом ударной ионизации; б) исследование влияния ударной ионизации на ВАХ; в) расчет ВАХ с учетом ЭСЛ; г) исследование влияния ЭСЛ на ВАХ; д) объяснить характерные особенности в поведении  $\varphi, n$ .

Doping = 1,

Accuracy = 1.

$V_G$  – постоянное напряжение на затворе;  $V_{Din}$  – начальное напряжение на стоке;  $V_{Dstep}$  – шаг изменения напряжения на стоке;  $V_{Dfin}$  – конечное напряжение на стоке.

Задания:

№1:

$V_G = 3,0V$ ;  $V_{Din} = 0V$ ;  $V_{Dstep} = 1,5V$ ;  $V_{Dfin} = 15V$ .

а) с учетом ударной ионизации:  $AVALANCHE = 1$ .

б) с учетом ЭСЛ:  $ITI = 1$ .

№2:

$V_G = 3,25V$ ;  $V_{Din} = 0V$ ;  $V_{Dstep} = 1,5V$ ;  $V_{Dfin} = 15V$ .

а) с учетом ударной ионизации:  $AVALANCHE = 1$ .

б) с учетом ЭСЛ:  $ITI = 1$ .

№3:

$V_G = 2,75V$ ;  $V_{Din} = 0V$ ;  $V_{Dstep} = 1,5V$ ;  $V_{Dfin} = 15V$ .

а) с учетом ударной ионизации:  $AVALANCHE = 1$ .

б) с учетом ЭСЛ:  $ITI = 1$ .

№4:

$V_G = 3,0V$ ;  $V_{Din} = 0V$ ;  $V_{Dstep} = 2,5V$ ;  $V_{Dfin} = 15V$ .

а) с учетом ударной ионизации:  $AVALANCHE = 1$ .

б) с учетом ЭСЛ:  $ITI = 1$ .

№5:

$V_G = 3,25V$ ;  $V_{Din} = 0V$ ;  $V_{Dstep} = 2,5V$ ;  $V_{Dfin} = 15V$ .

а) с учетом ударной ионизации:  $AVALANCHE = 1$ .

б) с учетом ЭСЛ:  $ITI = 1$ .

№6:

$V_G = 2,75V$ ;  $V_{Din} = 0V$ ;  $V_{Dstep} = 2,5V$ ;  $V_{Dfin} = 15V$ .

а) с учетом ударной ионизации:  $AVALANCHE = 1$ .

б) с учетом ЭСЛ:  $ITI = 1$ .

Литература: [1 - 6].

**Восстановить параметр ITI = 0.**

## **Лабораторная работа №7 «Исследование влияния точности моделирования на передаточные характеристики МОП-транзистора с коротким каналом»**

Цель работы: а) исследовать влияние точности моделирования на рассчитанные подпороговые характеристики МОП-транзистора; б) установить отличия в распределениях  $\phi, n$ ; в) исследовать влияние точности на пороговое напряжение.

Avalanche = 0,

Doping = 1.

VGin – начальное напряжение на затворе; VGstep – шаг изменения напряжения на затворе; VGfin – конечное напряжение на затворе; VD – постоянное напряжение на стоке.

Задания:

№1:

VGin = - 0,5B; VGstep = 0,1B; VGfin = 1,5B; VD = 0,2B;

а) accuracy = 1; б) accuracy = 3; в) accuracy = 2.

№2:

VGin = - 0,5B; VGstep = 0,1B; VGfin = 1,5B; VD = 0,3B;

а) accuracy = 1; б) accuracy = 3; в) accuracy = 2.

№3:

VGin = - 0,5B; VGstep = 0,1B; VGfin = 1,5B; VD = 0,4B;

а) accuracy = 1; б) accuracy = 3; в) accuracy = 2.

№4:

VGin = - 0,5B; VGstep = 0,1B; VGfin = 1,5B; VD = 0,5B;

а) accuracy = 1; б) accuracy = 3; в) accuracy = 2.

№5:

VGin = - 0,5B; VGstep = 0,1B; VGfin = 1,5B; VD = 0,6B;

а) accuracy = 1; б) accuracy = 3; в) accuracy = 2.

№6:

VGin = - 0,5B; VGstep = 0,1B; VGfin = 1,5B; VD = 0,7B;

а) accuracy = 1; б) accuracy = 3; в) accuracy = 2.

Литература: [3,5,6].

## Полный файл исходных данных к программе SIMOS

```
WFILE.DAT
RFILE.DAT
UISIMOS.DAT
15      NX      - число узлов по оси X
5       NX1     - число узлов на контакте истока
5       NX2     - число узлов на контакте стока
10      NY      - число узлов по оси Y
0       IR      - не используется
0       IMESH   - задание сетки 0-равномерная, 1-по точкам
1       IMU     - подвижность
1       INP     - не используется
0       IPRINT  - печать (0,1,2)
0       ITI     - сильное легирование (0,1)
0       IG      - лавина (0,1)
0       NG      - не используется
0       IEN     - не используется
.03000+00 HD1    - толщина окисла 1-го затвора
.02000+00 HD2    - толщина окисла 2-го
.02000+00 HD3    - толщина окисла 3-го
.10000+01 HW     - ширина прибора
.30000+01 YL     - глубина
.02000+00 NY0    - шаг под затвором вглубь
.20000+01 XL     - длина прибора
.04000+01 XG1    - координата левого края затвора
.16000+01 XG6    - координата правого края затвора
.16000+01 XG2    - координата правого края 1-го затвора
.15000+01 XG3    - координата левого края 2-го затвора
.13000+01 XG4    - координата правого края 2-го затвора
.65000+01 XG5    - координата левого края 3-го затвора
.10000+01 DLDD   - сдвиг маски для LDD-транзистора
.06000+00 ADX    - параметр Гаусса истока-стока по поверхности
.08000+00 ADY    - параметр Гаусса истока-стока в глубину
.10000+00 ADXLD  - параметр Гаусса LDD поверхностный
.30000+00 ADYLD  - параметр Гаусса LDD в глубину
.00000+00 YD     - положение максимума LDD по глубине
.05000+00 AA1    - параметр 1-го Гаусса подлегирования подложки
.10000+00 AA2    - параметр 2-го Гаусса подлегирования подложки
.00000+00 YA1    - положение 1-го максимума подлегирования по глубине
.35000+00 YA2    - положение 2-го максимума подлегирования по глубине
.10000+00 XQS    - не используется
```

.10000+00	AQS	- не используется
.20000+10	DN	- максимальная концентрация в истоке-стоке
.00000+06	DN1	- максимальная концентрация в LDD
.10000+06	AN	- концентрация в подложке
.20000+07	AN1	- максимум 1-го подлегирования
.00000+00	AN2	- максимум 2-го подлегирования
.00000+00	VS	- напряжение на истоке
.00000+01	VD	- напряжение на стоке
.00000+00	VB	- напряжение на подложке
-.55400+00	VG1	- напряжение на 1-ом затворе
.00000+02	VG2	- напряжение на 2-ом затворе
.00000+02	VG3	- напряжение на 3-ом затворе
.00000+00	HVS	- шаг по напряжению на истоке
.00000+01	HVD	- шаг по напряжению на стоке
.00000+00	HVB	- шаг по напряжению на истоке
.00000+01	HVG1	- шаг по напряжению на 1-ом затворе
.00000+00	HVG2	- шаг по напряжению на 2-ом затворе
.00000+00	HVG3	- шаг по напряжению на 3-ом затворе
.00000+00	VSF	- конечное напряжение на истоке
.00000+01	VDF	- конечное напряжение на стоке
.00000+00	VBF	- конечное напряжение на подложке
.00000+01	VG1	- конечное напряжение на 1-ом затворе
.00000+00	VG2	- конечное напряжение на 2-ом затворе
.00000+00	VG3	- конечное напряжение на 3-ом затворе
-.00000+01	VFB1	- не используется
.00000+00	VFB2	- не используется
.00000+00	VFB3	- не используется
.00000+00	VBAV	- не используется
.10000-04	TN	- время жизни электронов
.20000-04	TP	- время жизни дырок
.00000+01	QSH	- поверхн.концентрация однородн. QSS $1e10/cm^2$
.00000+00	QSG	- не используется
.14000+04	UMN	- подвижность электронов
.48000+03	UMP	- подвижность дырок
.09000+05	RSUB	- сопротивление подложки
.42500+01	FIM	- работа выхода металла затвора
.40500+01	FIS	- работа выхода полупроводника
.11200+01	EG	- ширина запрещенной зоны

Автор выражает благодарность аспирантке Н.В. Коломейцевой за набор текста данного учебно-методического пособия.

## Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. – М.: Мир, 1984. – Кн. 1: 456 с.; Кн. 2: 456 с.
2. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем. – М.: Мир, 1991. – 327 с.
3. Абрамов И.И. Курс лекций «Моделирование элементов интегральных схем». Учеб. пособие. – Мн.: БГУ, 1999. – 92 с.
4. Абрамов И.И. Курс лекций «Моделирование элементов интегральных схем». Ч.2 : Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 2000. – 72 с.
5. Абрамов И.И., Харитонов В.В. Численное моделирование элементов интегральных схем. – Мн.: Выш. шк., 1990. – 224 с.
6. Абрамов И.И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. – Мн.: БГУ, 1999. – 189 с.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

**Абрамов Игорь Иванович**

Моделирование МОП-структур

Учебно-методическое пособие к лабораторным работам  
по дисциплине

«Моделирование технологических процессов и  
элементов интегральных схем»  
для студентов специальности

41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы»  
дневной формы обучения

Редактор Т.Н. Крюкова  
Компьютерная верстка М.В. Шишло

---

Подписано в печать 13. 10. 2004.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 1,2.

Формат 60x84 1/16.  
Печать ризографическая.  
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 1,51.  
Заказ 373.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.  
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6