

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра электронных систем**

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

*Методические указания к выполнению курсовой работы  
для студентов специальности 11.05.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2021**

УДК 621.38(073)

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ:**

Методические указания к выполнению курсовой работы / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *О.В. Денисова, А.А. Белицкий*. СПб, 2021. 24 с.

В курсовой работе в качестве объекта исследования и расчета выбран полевой транзистор с изолированным затвором. Представлены теоретические сведения о структуре транзистора, методика расчета основных электрофизических параметров транзистора, рассматриваются возможности масштабирования и эффекты короткоканальных транзисторов в составе интегральных схем.

Предназначены для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Научный редактор доц. *И.И. Растворова*

Рецензент доц. *С.Д. Дубровенский* (Санкт-Петербургский государственный технологический институт)

УДК 621.38(073)

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ:** Методические указания к выполнению курсовой работы / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *О.В. Денисова, А.А. Белицкий*. СПб, 2020. 24 с.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Научный редактор: зав.кафедрой ЭС Горного университета, доц. *И.И.Растворова*

Рецензент: канд. хим. наук, доц. *С.Д. Дубровенский* (Санкт-Петербургский государственный технологический институт)

© Санкт-Петербургский  
горный университет, 2020

## Введение

В соответствии с учебным планом курсовая работа по дисциплине «Физические основы микро- и нанoeлектроники» выполняется студентами, обучающимися по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» на 2 курсе в 4 семестре.

Цели выполнения курсовой работы:

- помочь обучающимся систематизировать, закрепить и углубить знания теоретического характера;
- научить студентов приемам решения практических задач, способствовать овладению навыками и умениями выполнения расчетов, графических и других видов заданий;
- научить их работать с книгой, служебной документацией и схемами, пользоваться справочной и научной литературой;
- упрочить образовавшиеся на лекции связи и ассоциации путем повторяющегося выполнения действий, характерных для изучения дисциплины (однообразные стереотипные повторения не приводят к осмыслению знаний);
- формировать умение учиться самостоятельно, то есть овладеть методами, способами и приемами самообучения, саморазвития и самоконтроля;
- обеспечивать развитие творческой активности личности студента, его научного мышления и речи; способствовать росту обучающихся как творческих работников;
- проверить знания студентов при защите курсовой работы.

В курсовой работе в качестве объекта исследования и расчета выбран полевой транзистор с изолированным затвором. В первой части работы необходимо представить теоретические сведения о структуре транзистора, в котором имеются  $p$ - $n$  переходы и контактные композиции металл-диэлектрик-полупроводник.

Во второй части работы необходимо выполнить расчет основных электрофизических параметров всех областей транзистора, рассмотреть возможности масштабирования и эффекты короткоканальных транзисторов в составе интегральных схем.

В процессе выполнения курсовой работы студент должен обращаться к рекомендованным справочникам, а также к литературным источникам, указанным в библиографическом списке.

Таким образом, выполняются главные задачи курсовой работы – закрепление материала дисциплины, понимание взаимосвязи разделов дисциплины и освоение начальных практических навыков расчетов полупроводниковых структур.

## 1. Задание на курсовую работу

Тема курсовой работы формулируется следующим образом: «Расчет внутренней структуры полевого транзистора с изолированным затвором».

Студенту задается структура МОП – транзистора, топология которой и её вертикальный разрез представлены на рис. 1.

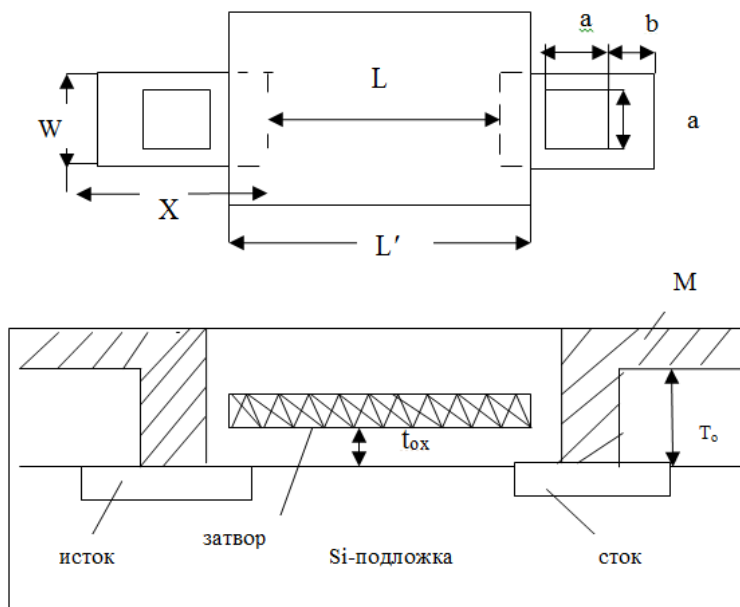


Рис.1. Топология и разрез МОП-транзистора

а рис.1 используются следующие обозначения:

$L'$  –длина канала в соответствии с фотошаблоном поликремниевое затвора;

$L$  – длина канала между истоком и стоком с учетом боковой диффузии при формировании истока и стока, оценочно  $L \approx 0,8L'$ .

$a$  – сторона квадрата – отверстия под металлизацию – это минимальный размер элемента для заданного уровня технологии;

$b$  – расстояние от края отверстия под металлизацию до края диффузионных областей истока и стока.

В случае минимизации площадей истока и стока для снижения паразитных емкостей параметр « $b$ » определяется допустимым рассовмещением фотошаблонов, формирующих сток-истоковые области и контакт к этим областям. Сюда же входит расширение площади истокового и стокового переходов за счет боковой диффузии примесей при формировании переходов. Можно принять

$$b_{min} = (0,6 \div 0,8)a.$$

Параметр  $X$  – это длина истоковой и стоковой областей, минимальный размер  $X$  определяется как  $X_{min} = a+2b$ .

Ширина канала  $W$  – это параметр, который определяет сопротивление канала в открытом состоянии и, соответственно, максимальную величину тока стока транзистора. В зависимости от схемного использования на практике, а также от требуемой выходной мощности транзистора параметр  $W$  может варьироваться от  $W_{min}$  до величины в десятки раз больше.

Кремниевая подложка в зависимости от индивидуального задания может быть либо  $n$ -типа (для  $p$ -МОП-транзисторов), либо  $p$ -типа (для  $n$ -МОП-транзисторов).

Материалом затвора выбирается поликремний. Поверхностное сопротивление этого материала 25 Ом/□. Оно значительно выше сопротивления металлов (например, для алюминия поверхностное сопротивление составляет 0,04 Ом/□), поэтому технологически на поверхности поликремния формируется слой силицида одного из тугоплавких металлов. Поверхностное сопротивление таких слоев составляет 1÷5 Ом/□. Для упрощения на схеме такая композиция не показана.

Толщина подзатворного диэлектрика  $t_{ox}$  (на основе оксида кремния) – это важнейший параметр, определяющий характеристики полевого транзистора, в частности, величину максимального тока стока.

При масштабировании структур транзистора наряду со снижением размера минимального элемента происходит снижение толщины подзатворного диэлектрика примерно по соотношению  $t_{ox} \sim a/2$  вплоть до наступления туннельного эффекта прохождения электронов сквозь тонкую пленку подзатворного диэлектрика под действием поперечного электрического поля затвор-канал.

$T_{ox}$  – толщина пленки диоксида кремния, формируемой для защиты полевого транзистора от паразитных эффектов, в частности, емкости металл – подложка.

Материалом металлизации выбран алюминий. Ширина и толщина шины уменьшаются в процессе масштабирования и увеличения плотности размещения элементов в составе интегральной схемы. В последнее время при снижении минимального размера элемента до величины 45 нм в технологии интегральных схем применяются медные проводники вместо алюминиевых.

Курсовая работа выполняется студентами на основе индивидуальных заданий.

В индивидуальных заданиях представлены 8 исходных параметров транзисторов: геометрические, электрические, электрофизические.

По последней цифре номера зачетной книжки студента проводится выбор 5 взаимосвязанных параметров транзисторной структуры (табл.1).

Системообразующим параметром является величина минимального размера элемента «а». С уменьшением этой величины при масштабировании снижается толщина подзатворного диэлектрика  $t_{ox}$ . Одновременно снижается напряжение питания  $U_{DD}$  для примерного сохранения величин токов и напряженностей электрических полей. В то же время уровень легирования кремниевой подложки ( $N_A$  для  $n$ -канальных транзисторов и  $N_D$  для  $p$ -канальных) по мере уменьшения параметра «а» должен увеличиваться, чтобы снизить влияние эффекта короткого канала.

Таблица 1

## Исходные данные для выполнения расчетов

Последняя цифра шифра	Минимальный размер элемента $a$ , мкм	Напряжение питания $U_{DD}$ , В	Толщина подзатворного диэлектрика $t_{ox}$ , нм	Концентрация примесей в подложке $N$ , $см^{-3}$	Градиент концентрации примесей в зоне переходной области истокового и стокового $p$ - $n$ -переходов $a_j$ , $см^{-4}$
0	2,50	5,0	45	$10^{16}$	$7 \cdot 10^{20}$
1	2,00	4,5	40	$2 \cdot 10^{16}$	$9 \cdot 10^{20}$
2	1,50	4,5	25	$2 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{21}$
3	1,00	4,0	20	$5 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{21}$
4	0,80	3,5	18	$5 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{21}$
5	0,50	3,0	15	$10^{17}$	$5 \cdot 10^{21}$
6	0,35	2,5	12	$10^{17}$	$6 \cdot 10^{21}$
7	0,25	2,0	7	$3 \cdot 10^{17}$	$8 \cdot 10^{21}$
8	0,18	1,8	5	$5 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{22}$
9	0,13	1,6	4	$5 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{22}$

Градиент концентрации примесей в зоне переходной области истокового и стокового  $p$ - $n$  переходов  $a_j$  используется для расчетов пробивных напряжений и ширины слоя пространственного заряда в  $p$ - $n$ -переходах.

Тип  $p$ - $n$ -перехода исток-подложка и сток-подложка принимается как «плавный», а градиент концентрации примесей увеличивается по мере масштабирования структур.

Длина канала  $L$  не задается в таблице, но условно может принимать значения от  $1a$  до  $3a$ .

В таблице 2 приведены три дополнительных независимых параметра, которые выбираются по предпоследней цифре номера зачетной книжки студента.

Варьируется тип МОП-транзистора с индуцированным каналом:  $n$ -МОП или  $p$ -МОП. Изменяется также ширина канала полевого транзистора  $W$ . Третьим независимым параметром является напряжение смещения  $U_{BS}$  – внешнее напряжение, приложенное между истоком и подложкой.



При наличии напряжения смещения, когда  $p$ - $n$ -переход подложка-исток смещен в обратном направлении (полярность смещения противоположна для  $p$ -МОП и  $n$ -МОП-транзисторов), обедненная область между подложкой и каналом получает дополнительное расширение, увеличивается объемный заряд, повышается напряженность электрического поля затвор-подложка, необходимая для формирования канала. Это приводит к увеличению порогового напряжения транзистора.

Таблица 2

Параметры МОП-структуры

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип канала МОП-транзистора	$n$	$p$	$n$	$p$	$n$	$p$	$n$	$p$	$n$	$p$
Напряжение смещения $U_{BS}$ , В	0	0,3	0,2	0	0,1	0	0,3	0	0,3	0,2
Ширина канала в долях от $X_{min}$ (кратность ширины канала) $\frac{X}{X_{min}}$	1	2	10	1	2	10	1	2	10	1

Выбрав свои варианты исходных данных из таблиц 1 и 2 в соответствии с номером зачетной книжки, студент получает все необходимые параметры МОП структуры для выполнения расчетов.

## 2. Методические указания для выполнения курсовой работы

Отчет по курсовой работе должен содержать введение, теоретическую, расчетную части, заключение и список литературы.

В теоретической части должны быть представлены сведения о контактах металл-диэлектрик-полупроводник и полевых транзисторах на их основе, представлена классификация полевых транзисторов, принцип их работы, основные материалы, используемые при производстве полевых транзисторов, структуры МДП-транзисторов

со встроенным и индуцированным каналами, а также выходные характеристики различных видов МДП-транзисторов.

Расчетная часть курсовой работы содержит три группы заданий, выполнение которых обязательно:

- определение предельных напряжений работы транзисторов;
  - расчет рабочих и максимальных значений тока стока;
  - оценка частотных характеристик транзистора по результатам расчета времени задержки сигнала по значениям паразитных емкостей.
- В отчете после выполнения каждой группы заданий необходимо провести анализ полученных результатов, сформулировать выводы.

Одним из главных параметров внутренней структуры МОП-транзистора является уровень легирования подложки. Увеличение концентрации примесей в подложке действует разнонаправленно на свойства транзистора. С одной стороны, при увеличении уровня легирования подложки снижается эффект короткого канала, а также увеличивается напряжение смыкания, но с другой стороны, избыточное легирование снижает подвижность носителей в канале и, следовательно, величину тока стока.

Расчет напряжения смыкания ( $U_p$ ) между истоком и стоком производится по формуле

$$U_p = \frac{L^2 \cdot qN}{2\epsilon_{Si} \cdot \epsilon_0}, \quad (1)$$

где  $N$  - концентрация примесей, заданная в табл.1;  $\epsilon_{Si}$  - относительная диэлектрическая проницаемость для кремния, равная 11,8.

$\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость ( $8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Необходимо в результате расчетов убедиться, что  $U_p > U_{DD} + U_{BS}$  и отразить это в выводах.

Высокий уровень легирования подложки снижает напряжение пробоя истокового и стокового  $p$ - $n$ -переходов. Естественно, интересует ситуация у стокового  $p$ - $n$  перехода, разность потенциалов на котором равна  $U_{DD} + U_{BS}$ . Необходимо проверить, что напряжение пробоя существенно выше этой разности потенциалов. Принимается, что переходная область  $p$ - $n$ -перехода имеет плавный характер. Градиент концентрации примесей в  $p$ - $n$ -переходе сток-подложка за-

дан в табл.1, а формула для определения напряжения пробоя  $U_a$  за-

писывается как:

$$U_a = \frac{4}{3} E_{\max}^{3/2} \left( \frac{2\varepsilon_{Si} \cdot \varepsilon_0}{qa_j} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $E_{\max}$  – электрическая прочность кремния, является справочной величиной и равна  $3 \cdot 10^7$  В/м.

Третий предельный параметр по напряжению, который требует проверки – это напряжение пробоя  $p$ - $n$ -перехода канал-подложка. Этот переход принимается резким и напряжение пробоя в этом случае оценивается по формуле:

$$U_S = \frac{\varepsilon_{Si} \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{\max}^2}{2qN} \quad (3)$$

Если напряжение пробоя превосходит напряжение в зоне стока ( $U_{DD} + U_{BS}$ ), то дальнейший расчет проводится в соответствии с заданием. Если нет – надо изменить начальные условия, например, уменьшить уровень легирования подложки, но пояснить, что при этом будет происходить. Возможен второй вариант действий: уменьшить напряжение источника питания, но при этом, рассчитав пороговое напряжение, необходимо убедиться, что его величина позволяет вывести транзистор в состояние насыщения.

Вторая группа заданий курсовой работы предполагает определение значений тока стока. Для этого следует рассмотреть параметры канала: прежде всего это подвижность носителей в канале. Высокий уровень легирования подложки предполагает учет двух видов рассеяния носителей: на колебаниях кристаллической решетки и на ионизированных примесях. Для заданных значений концентрации примесей ( $N \leq 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) при комнатной температуре вырождение еще не наступает, поэтому можно полагать, что все примеси ионизованы и в формуле, определяющей подвижность за счет механизма рассеяния на ионах примеси  $N_a$  или  $N_d \approx N_i$ , где  $N_i$  – концентрация ионов примеси.

Формула (4) для расчета общей подвижности носителей заряда называется формулой Конуэлл–Вайскопфа.

Эта формула достаточно громоздка, однако, применяется в расчетах именно в таком виде. Для облегчения расчетов приведены

значения эффективной массы для электронов и дырок в кремнии:  $m_e^* = 0,328m_0$  и  $m_h^* = 0,55m_0$ , где  $m_0$  – масса свободного электрона. Величину  $kT$  проще подставлять в формулу в электрон–Вольтах (эВ), зная, что  $kT = 0,026$  эВ, а  $1$  эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

$$\mu_i = \frac{64\sqrt{\pi} \cdot (\varepsilon_{Si} \cdot \varepsilon_0)^2 \cdot (2kT)^{3/2}}{N_i \cdot q^3 \cdot m^{*1/2}} \left\{ \ln \left[ 1 + \left( \frac{12\pi\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 kT}{q^2 N_i^{1/3}} \right)^2 \right] \right\}^{-1} \quad (4)$$

Запишем формулу (4) в упрощенном виде и получим

$$\mu_i = A(\ln(1 + B))^{-1}.$$

Общая подвижность, учитывающая как рассеяние на колебаниях кристаллической решетки ( $\mu_\ell$ ), так и на ионах примеси ( $\mu_i$ ),

определяется по формуле

$$\mu = \left( \frac{1}{\mu_\ell} + \frac{1}{\mu_i} \right)^{-1}, \quad (5)$$

$\mu_\ell$  - берется из справочных данных:

$$\mu_{\ell e} = 1,5 \frac{\text{м}^2}{\text{В с}}, \quad \mu_i = 0,45 \frac{\text{м}^2}{\text{В с}}.$$

Сделаем вывод о влиянии явления рассеяния носителей заряда на ионах примеси и вкладе этой составляющей в общую величину подвижности.

Следующий параметр, который необходимо вычислить для определения тока стока - пороговое напряжение. Пороговое напряжение предполагает создание внешнего заряда такой величины, чтобы он скомпенсировал заряд подзатворного диэлектрика и при этом перевел поверхность подложки в состояние сильной инверсии, то есть

$$U_T = \frac{Q_S}{C_{ox}} + 2\varphi_B, \quad (6) \quad \text{где}$$

$U_T$  – пороговое напряжение, которое в транзисторах с индуцированным каналом создает этот канал;

$Q_S$  – внешний заряд, который должен быть скомпенсирован;

$C_{ox}$  – удельная емкость подзатворного диэлектрика;

$\varphi_B$  – объемный потенциал Ферми ( $2\varphi_B$  – условие сильной инверсии поверхности).

Раскрывая (6), получаем

$$U_T = \frac{2(\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 \cdot q \cdot N \cdot \varphi_B)^{1/2}}{C_{ox}} + 2\varphi_B, \quad (7)$$

$$\varphi_B = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{N}{n_i}\right), \quad (8)$$

где  $n_i$  – концентрация собственных носителей заряда в кремнии ( $n_i=1,45 \cdot 10^{10} \text{см}^{-3}$ ).

Удельную емкость подзатворного диэлектрика определим

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox} \cdot \varepsilon_0}{t_{ox}}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{ox}$  – относительная диэлектрическая проницаемость оксида кремния ( $\varepsilon_{ox}=3,9$ ), которую нельзя путать с диэлектрической проницаемостью кремния ( $\varepsilon_{Si}=11,8$ ).

Расчетные значения  $U_T$ , естественно, не должны превышать напряжение питания, так как тогда ни при каком возможном значении напряжения на затворе, вплоть до  $U_{DD}$ , невозможно сформировать канал. В этом случае следует уменьшать концентрацию примесей в подложке по сравнению с заданием.

На величину порогового напряжения влияет наличие разности потенциалов исток-подложка. При этом обедненная область между подложкой и каналом возрастает, увеличивается объемный заряд, что приводит к возрастанию порогового напряжения. В задании на курсовую работу в нескольких вариантах даны значения обратного напряжения исток-подложка от 0,1 до 0,3 В. Упрощенно можно принять, что увеличение порогового напряжения  $\Delta U_T$  соответствует выражению

$$\Delta U_T = \frac{1}{2} \sqrt{U_{BS}}. \quad (10)$$

Естественно, что в дальнейших расчетах, где задействован параметр порогового напряжения, эту прибавку необходимо учитывать.

Выражения для тока стока описываются уравнениями, имеющими различный вид для крутой области вольт–амперной характеристики  $I_D = f(U_D)$  и пологой области насыщения тока.

$$\text{Для крутой области} \quad I_D = \frac{W}{L} \mu C_{ox} (U_G - U_T) U_D \quad (11)$$

$$\text{Для пологой области} \quad I_D = \frac{W}{2L} \mu C_{ox} (U_G - U_T)^2 \quad (12)$$

Насыщение тока, описываемое выражением (12), вызвано физическим явлением ликвидации канала вблизи стока, при условии, что  $U_D \geq (U_G - U_T)$  и ток стока перестает зависеть от напряжения на стоке.

Величина тока стока является одним из определяющих параметров структуры МОП-транзистора. Выделение достаточной мощности на нагрузочном элементе дает хорошую помехоустойчивость цифровых устройств при передаче сигнала из одной ячейки в другую. Ток стока определяет характеристику переключения. Переключение большим током повышает скорость процесса. Повышение напряжения на затворе до  $U_{DD}$  (соединение затвора со стоком) повышает ток стока по квадратичной зависимости (12).

Однако, для масштабирования структур до субмикронных значений длины канала (к которым относится большинство вариантов заданий для расчетов) при сильных электрических продольных полях возникает эффект насыщения дрейфовой скорости носителей. Скорость переноса, то есть ток, перестает зависеть от напряженности электрического поля. Напряжение, при котором наблюдается эффект насыщения дрейфовой скорости носителей, обозначаемое  $U_o$ , определяется по формуле

$$U_o = \frac{L \cdot V_S}{\mu}, \quad (13)$$

где  $V_S$  – скорость насыщения.

По разным источникам  $V_S$ – для кремния равна от  $5 \cdot 10^6$  см/с до  $10^7$  см/с. Сравнительные расчеты можно выполнить для обоих значений  $V_S$ .

В том, что эффект насыщения дрейфовой скорости должен учитываться при предложенных в заданиях параметрах, легко убедиться. Средняя напряженность электрического поля в канале

$$\left( E = \frac{U_{DD}}{L} \right)$$

составляет несколько единиц на  $10^4$  В/см.

Скорость насыщения  $V_S$  оценочно достигается при

$$E_{kp} = 3 \frac{C_S}{\mu}$$

где  $C_S$  - скорость звука в кремнии ( $C_S = 3,92 \cdot 10^5$  см/с), то есть является величиной такого же порядка. В то же время такая напряженность поля еще далека от критической, когда развивается лавина (для кремния  $E_{kp} = 3 \cdot 10^5$  В/см).

Максимальный ток стока для структур с субмикронными размерами аппроксимируется простой формулой:

$$I_{Dmax} = W \cdot C_{ox} \cdot V_S (U_G - U_T). \quad (14)$$

Формула (14) отличается от формулы (12) тем, что зависимость  $I_{Dmax}$  от  $U_G$  является линейной, а по формуле (12) - квадратичная.

Необходимо рассчитать и построить зависимость тока стока от напряжения на затворе по формуле (12) и по формуле (14). Для того чтобы почувствовать разницу в величинах токов насыщения требуется построить выходные характеристики для двух вариантов токов насыщения: одну – при переходе тока в насыщение, начиная с величины  $U_D = U_o$ , а вторую – при условии, что ток становится насыщенным при  $U_D = U_G - U_T$ , то есть в классическом случае перекрытия канала в транзисторе.

В предлагаемых расчетах есть два момента некоторой неопределенности, и оба они связаны с величиной подвижности. Подвижность, рассчитанная ранее с учетом двух механизмов рассеяния, в мелких и узких каналах становится еще меньше за счет рассеяния носителей при взаимодействии с краями канала и поверхностью

кристалла кремния. Коэффициент снижения подвижности не может быть рассчитан количественно, но может достигать 2,0. При масштабировании не только снижается минимальный размер элемента, но и уменьшается глубина канала, что приводит к снижению эффективного значения подвижности. Это явление дает неопределенность при вычислении  $U_o$ .

Сама величина тока стока в крутой области вольт – амперной выходной характеристики также зависит от подвижности и сшивка двух областей – омической и области с насыщением скорости носителей или области с перекрытием канала будет происходить при различных напряжениях на стоке:  $U_o$  и  $(U_G-U_T)$ . Графическое построение вольт – амперных характеристик с двумя различными механизмами формирования максимального тока стока позволяет наглядно оценить эту переходную фазу. Тут можно поварьировать величиной подвижности. Если  $(U_G-U_T) > U_o$  – то ток стока насыщается за счет насыщения скорости носителей, а если  $(U_G-U_T) < U_o$ , то насыщение тока стока происходит за счет перекрытия канала. При  $U_D=U_G-U_T = U_o$  совпадает действие обоих механизмов насыщения тока стока. Скорости насыщения электронов и дырок практически не отличаются, а наклоны омических частей вольт – амперной выходной характеристики будут различными для  $p$ -МОП и  $n$ -МОП структур.

Третьей группой заданий курсовой работы является расчет емкостей элементов внутренней структуры МОП-транзистора и по их значениям расчет времени задержки сигнала на перезарядку емкостей. Принимаются в расчет три вида емкостей:

- емкость затвора;
- емкость подложки;
- емкость стокового  $p$ - $n$  перехода.

Строго говоря, к емкостям элементов внутренней структуры следовало бы отнести и емкость металлизации, однако, основная составляющая этой емкости лежит за пределами внутренней МОП структуры. В пределах внутренних элементов находится металлизация, слой которой лежит на слое оксида кремния, толщина которого в десятки раз больше тонкой пленки оксида кремния, а следовательно, при размерах площади одного порядка емкость металлизации в



пределах МОП структуры будет в десятки раз меньше емкости затвора.

Другое дело - за пределами внутренней структуры транзистора. Современная многослойная металлизация в топологии интегральных схем, близкое соседство параллельных шин в одном слое, пересечение шин в разных слоях металлизации при сравнительно тонком межслойном диэлектрике – все это приводит к тому, что паразитная емкость многослойной металлизации оказывается основной, которая определяет времена задержки сигналов в интегральных схемах.

Однако, эти расчеты не входят в состав данной курсовой работы, где учитываются лишь элементы внутренней структуры МОП - транзистора.

Удельная емкость затвора  $C_{G_{з\delta}}$  рассчитывается по простейшей формуле (15) плоского конденсатора. Тонкая пленка оксида кремния толщиной  $t_{ox}$  является диэлектриком конденсатора, а обкладками конденсатора служат затвор и канал.

$$C_{G_{з\delta}} = \frac{\varepsilon_{SiO_2} \cdot \varepsilon_0}{t_{ox}} \quad (15)$$

Для расчета численного значения емкости затвора надо удельную емкость умножить на площадь. Площадью затвора можно определить по формуле

$$L' \cdot (n \cdot X_{min}),$$

где  $n$  – кратность ширины канала, заданного в таблице 2.

Удельная емкость подложки формируется в контакте канал – подложка. Этот  $p$ - $n$ -переход принимается резким. Контактная разность потенциалов принимается равной  $2\phi_B$ , так как реализуется режим сильной инверсии.

Внешнее напряжение ( $U_D + U_{BS}$ ) распределено по длине канала, поэтому для расчета удельной емкости подложки берется половина этой суммы. Более того, возникает вопрос: какую брать величину, когда ток стока выходит на насыщение: либо  $U_0$ , если  $ID_{max}$  достигается вследствие насыщения скорости носителей, либо ( $U_G - U_T$ ), если  $ID_{max}$  достигается из-за перекрытия канала.

Удельную емкость подложки определяем по формуле (16). Для определения численного значения емкости подложки удельная емкость умножается на площадь, которую можно принять равной площади для вычисления емкости затвора.

$$C_{B_{yo}} = \left[ \frac{\varepsilon_{Si} \cdot \varepsilon_0 \cdot q \cdot N}{2U} \right]^{1/2}, \quad (16)$$

$$U = \frac{U_D + U_{BS}}{2} + 2\varphi_B$$

где

Удельная емкость стокового  $p$ - $n$ -перехода формируется в результате контакта стока с подложкой, при этом переход полагается плавным. Градиент концентрации стока  $a_j$  задан для расчетов в таблице 1. Разность потенциалов на стоковом переходе состоит из полной суммы  $(U_D + U_{BS})$  и контактной разности потенциалов  $\varphi_k$  областей подложки и стока. Величина  $\varphi_k$  вычисляется по приближенной формуле

$$\varphi_k = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{a_j \cdot \delta}{2n_i} \right)^2, \quad (17)$$

где  $\delta$  – толщина слоя пространственного заряда  $p$ - $n$ -перехода.

Можно принять, что для крайних значений заданных градиентов (от  $7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4}$ ) величина  $\delta$  меняется от 0,5 мкм до 0,15 мкм, соответственно. Не будет большой ошибкой, если для промежуточных значений  $a_j$  провести интерполяцию значений  $\delta$ .

С учетом изложенного удельная емкость стокового  $p$ - $n$ -перехода вычисляется по следующей формуле

$$C_{D_{yo}} = \left[ \frac{q \cdot a_j (\varepsilon_{Si} \cdot \varepsilon_0)^2}{12 (U_D + U_{BS} + \varphi_k)} \right]^{1/3} \quad (18)$$

Площадь «доньшка»  $p$ - $n$ -перехода определяется как  $(a+2b) \cdot (nX_{min})$ . В площадь  $p$ - $n$ -перехода должны входить кроме «доньшка» вертикальные стенки, перпендикулярные плоскости под-

ложки. Их периметр легко вычисляется, а глубину можно задать как 0,3 от минимального размера элемента  $a$ .

Все три вида емкости формируются по независимым физическим механизмам, поэтому общая емкость внутренней структуры МОП-транзистора вычисляется как сумма ее составляющих

$$C_{МОП} = C_G + C_B + C_D \quad (19)$$

Каждая из трех емкостей вычисляется путем умножения соответствующей удельной емкости на определенную площадь.

Необходимо проанализировать вклад каждой из составляющих емкостей и дать предложения по их уменьшению без ущерба для других параметров МОП структур. Результат представить в выводах.

Три составляющие емкости внутренней структуры МОП - транзистора как бы охватывают со всех сторон канал, который является общим элементом перезаряда емкостей.

Поэтому, переходя к расчету времени задержки сигналов при переключении, следует рассматривать  $RC$ -цепочку, где  $R$  – сопротивление канала, а  $C$  – соответствующая емкость. Время переключения определяется временем разряда собственных паразитных емкостей. Максимальная величина постоянной времени  $T_{МОП}$  достигается, когда  $U_D = U_{DD}$ , то есть напряжение на стоке равно напряжению источника питания,  $U_G = U_{DD}$ , то есть напряжение на затворе максимально и равно напряжению источника питания (затвор и сток соединены между собой). Максимальная величина тока стока вычисляется по формуле (12) или (14) в зависимости от механизма установления  $ID_{max}$  либо вследствие ликвидации канала вблизи стока (12) или при достижении в канале скорости насыщения носителей заряда (14).

Выражение для постоянной времени  $T_{МОП}$  при омическом поведении носителей в канале записывается в виде

$$T_{МОП} = \left( \frac{2U_{DD}}{\varepsilon_{ox} \cdot \varepsilon_0 \mu (U_{DD} - U_T)^2} \right) \left( \frac{t_{ox} \cdot L}{n \cdot W_{min}} \right) \cdot C_{МОП} \quad (20)$$

Выражение для постоянной времени  $T_{МОП}$  для случая достижения скорости насыщения носителей в канале записывается в виде:

$$T_{МОП} = \left( \frac{U_{DD}}{\varepsilon_{ox} \cdot \varepsilon_0 \cdot V_s (U_{DD} - U_T)} \right) \left( \frac{t_{ox}}{n \cdot W_{min}} \right) \cdot C_{МОП} \quad (21)$$

Для вариантов заданий, где потенциал подложки относительно истока не равен нулю, к  $U_{DD}$  необходимо прибавить  $U_{GS}$ .

Анализируя выражениях (20) и (21) не нужно думать, что существует зависимость  $T_{МОП}$  от ширины канала. Во всех составляющих общей емкости  $C_{МОП}$  в формулах площади учитывается ширина канала  $n \cdot W_{min}$ , поэтому эти члены взаимно уничтожаются и  $T_{МОП}$  не зависит от ширины канала.

Формулы (20) и (21) являются фундаментальными для оценки возможности использования МОП-транзисторов в качестве переключающих элементов.

В рамках курсовой работы необходимо исследовать каждый член, входящий в эти выражения. Особо следует рассмотреть возможности дальнейшего масштабирования предложенного варианта МОП-структуры.

При уменьшении минимального размера элемента  $a$  толщина оксидной пленки снижается, но в меньшей пропорции, чем  $a$ , учитывая возможность туннелирования электронов сквозь тонкую пленку оксида кремния (хотя для предотвращения возникновения туннелирования снижается напряжение питания). Длина канала тоже уменьшается слабее, чем прямопропорционально  $a$ . Ширина канала масштабируется примерно пропорционально минимальному размеру элемента, так как это требуется для увеличения плотности размещения транзисторов в интегральной схеме. Как результат - общая паразитная емкость масштабируется более, чем линейно, но слабее, чем квадратично с уменьшением  $a$ . Примерная оценка показывает зависимость  $C(W, L) \sim a \cdot 3/2$ . Так как  $t_{ox}$  и  $L$  масштабируются слабее, чем линейно, например, как  $a^{1/2}$ , то для формулы с омическим транспортом носителей (20) время задержки определяется

$$T_{МОП} \sim C(W, L) \sim a \cdot 3/2. \quad (22)$$

Уменьшение паразитных емкостей имеет свой предел. Кроме технологических ограничений (уровень технологии определяет минимальную допустимую величину размера элемента  $a$ ) узловым моментом становится емкость металлизации, которая не рассматривается в курсовой работе. Если емкость между двумя соседними полосками металлизации (емкость боковых стенок) становится сравнима с паразитной емкостью внутренних элементов МОП-структуры, то дальнейшее масштабирование межсоединений неэффективно, что приводит к необходимости увеличения слоев металлизации (не сокращая расстояния между полосками), а этот прием также имеет свой предел.

Желательно, чтобы в процессе выполнения курсовой работы студент провел анализ и выполнил альтернативные расчеты времени задержки с учетом масштабирования элементов.

### **3. Рекомендации к последовательности выполнения курсовой работы**

1. Выполнить чертеж внутренней структуры транзистора в пропорциях заданного варианта (тонкая пленка оксида кремния может быть вычерчена вне пропорций).
2. Расчет напряжения смыкания по формуле (1) на предмет сохранения канала (или его части) во всем диапазоне напряжений на стоке вплоть до напряжения питания плюс напряжение на подложке.
3. Проверка величины напряжения пробоя  $U_a$  стокового  $p$ - $n$ -перехода по формуле (2). Оно должно превышать напряжение питания плюс напряжение на подложке.
4. Определение напряжения пробоя канал – подложка  $U_S$  по формуле (3). Необходимо убедиться в отсутствии условий пробоя во всем диапазоне напряжений на стоке.
5. Расчет подвижности носителей в подложке и канале с учетом механизма рассеяния на ионах примесей (4), рассеяния на колебаниях решетки (табличные данные) и общей подвижности по формуле (5).

6. Вычисление порогового напряжения МОП структуры по формуле (7) для последующего определения тока стока.
7. Вычисление тока стока МОП-транзистора. Возможны два варианта. Если по варианту задания  $U_0 < (U_G - U_T)$ , то вычисляется для заданного значения  $U_G$  выходная характеристика  $I_D = f(U_D)$  по формуле (11) – крутой участок и по формуле (14) – пологий участок. Второй вариант –  $(U_G - U_T) < U_0$ . В этом случае для заданного значения  $U_G$  выходная характеристика  $I_D = f(U_D)$  вычисляется по формуле (11) – крутой участок и по формуле (12) – пологий участок.
8. Построение семейства графиков  $I_D = f(U_D)$  для различных значений напряжения на затворе вплоть до максимального ( $U_{DD}$ ). При этом полагая часть выходной характеристики при малых значениях напряжения на затворе (малость члена  $(U_G - U_T)$ ) может определяться отсечкой канала, а при больших значениях напряжения на затворе – механизмом скорости насыщения транспорта.
9. Построение градиентов  $ID_{max} = f(U_G)$  для двух случаев механизма насыщения тока.
10. Расчет удельных емкостей затвора (формула (15)), подложки (формула (16)), стокового  $p$ - $n$ -перехода (формула (18)) и полной емкости внутренних элементов МОП-структуры (формула (19)).
11. Анализ вклада каждой из емкостей и предложения по снижению общей емкости структуры
12. Вычисление постоянной времени  $T_{МОП}$  МОП-транзистора при параметрах, дающих омическое поведение носителей в канале (формула (20)) и при параметрах в условиях насыщения скорости носителей в канале (формула (21)).
13. Анализ зависимости времени задержки сигнала от входящих в формулу (20) и (21) параметров.
14. Учебная и научно-техническая литература, необходимая студенту для выполнения курсовой работы, приводится в библиографическом списке.

## Заключение

Таким образом, при выполнении курсовой работы, обучающиеся закрепляют знания, полученные на лекциях, а также приобретают навыки практической деятельности, выполняя расчеты конкретной приборной структуры, выполняют графическую часть работы, проводят анализ полученных результатов, делают выводы о целесообразности выполнения масштабирования приборных структур.

## 4. Библиографический список Основная литература

1. Материаловедение и технологии электроники: Учебное пособие / В.И. Капустин, А.С. Сигов. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 427 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат). (переплет) ISBN 978-5-16-008966-9, режим доступа:

<http://znanium.com/bookread2.php?book=416461>.

2. Сушков, В.П. Конструирование компонентов и элементов микро- и нанoeлектроники. Компьютерное моделирование оптоэлектронных приборов [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.П. Сушков, Г.Д. Кузнецов, О.И. Рабинович. — Электрон. дан. — Москва: МИСИС, 2012. — 128 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/47472>.

3. Подвигалкин, В.Я. Толстые плёнки радиоэлектроники. Физико-технические основы, гетероструктурные среды, приложения [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Я. Подвигалкин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 212 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/91290>.

## Дополнительная литература

1. Сильвашко, С.А. Программные средства компьютерного моделирования элементов и устройств электроники: учебное пособие / С.А. Сильвашко, С.С. Фролов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет», Кафедра про-

мышленной электроники и информационно-измерительной техники. - Оренбург: ОГУ, 2014. - 170 с. : ил., схем. - Библиогр.: с. 162-163. ; То же [Электронный ресурс].

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=270293>.

2. *Петров, М.Н.* Моделирование компонентов и элементов интегральных схем [Электронный ресурс]: учебное пособие / М.Н. Петров, Г.В. Гудков. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2011. — 464 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/661>.

3. *Юзова, В.А.* Материалы и компоненты электронных средств [Электронный ресурс] : лаб. практикум / В. А. Юзова, О. В. Семенова, П. А. Харлашин. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. - 140 с. - ISBN 978-5-7638-2496-4. Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=442958>.

### **Ресурсы сети «Интернет»**

1. Библиотека ГОСТов [www.gostrf.com](http://www.gostrf.com).

2. Сайт Российской государственной библиотеки. <http://www.rsl.ru/>

3. Сайт Государственной публичной научно-технической библиотеки России. <http://www.gpntb.ru/>

4. Каталог образовательных интернет ресурсов <http://www.edu.ru/modules.php>

5. БД JSTOR полнотекстовая база англоязычных научных журналов [www.jstor.org](http://www.jstor.org)

6. Научная электронная библиотека [www.eLibrary.ru](http://www.eLibrary.ru) (доступ к полным текстам ряда научных журналов с 2007 по 2009 г.)



## Содержание

Введение.....	3
1. Задание на курсовую работу.....	4
2. Методические указания для выполнения курсовой работы.....	8
3. Рекомендации к последовательности выполнения курсовой работы.....	20
Заключение.....	21
Библиографический список.....	22

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

*Методические указания к выполнению курсовой работы  
для студентов специальности 11.05.01*

Сост.: *О.В. Денисова, А.А. Белицкий*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
электронных систем

Ответственный за выпуск *О.В. Денисова*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 08.04.2021. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,4. Усл.кр.-отт. 1,4. Уч.-изд.л. 1,2. Тираж 75 экз. Заказ 295.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2