

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ПОЛЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРИБОРОВ**

*Учебно-методическое пособие*

Составители:  
А.В. Быстрицкий, Г.В. Быкадорова,  
К.Г. Пономарев, А.Ю. Ткачёв

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2017

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Физические основы работы МОП-транзисторов .....	4
2. Приборно-технологическое проектирование <i>n</i> -МОП-структур ....	15
2.1. Проект в программе-оболочке SENTAURUS Workbench .....	15
2.2. Технология создания <i>n</i> -МОП-структур .....	16
2.3. Физико-технологическая модель <i>n</i> -МОП-структуры в модуле SProcess .....	18
2.4. Оптимизация расчётной сетки в модуле SNMesh .....	23
2.5. Расчёт основных характеристик и параметров <i>n</i> -МОП-струк- туры в модулях SDevice и Inspect .....	26
2.5.1. Передаточная характеристика, пороговое напряжение и крутизна передаточной характеристики .....	26
2.5.2. Семейство выходных вольт-амперных характеристик, сопротивление сток-исток в открытом состоянии в линейной области и в области насыщения .....	29
2.5.3. Пробивное напряжение .....	32
Библиографический список .....	36

Т а б л и ц а 1.1

Структура и основные характеристики МОП-транзисторов

Тип	Структура	Общий вид вольт-амперных характеристик	
		передаточные	выходные
<i>n</i> -канальный нормально закрытый			
<i>p</i> -канальный нормально закрытый			
<i>n</i> -канальный нормально открытый			
<i>p</i> -канальный нормально открытый			

При напряжении на затворе больше порогового  $U_{зи} > U_{пор}$  и нулевом напряжении сток-исток  $U_{си} = 0$  канал имеет одинаковую толщину по всей длине (рис. 1.2а).

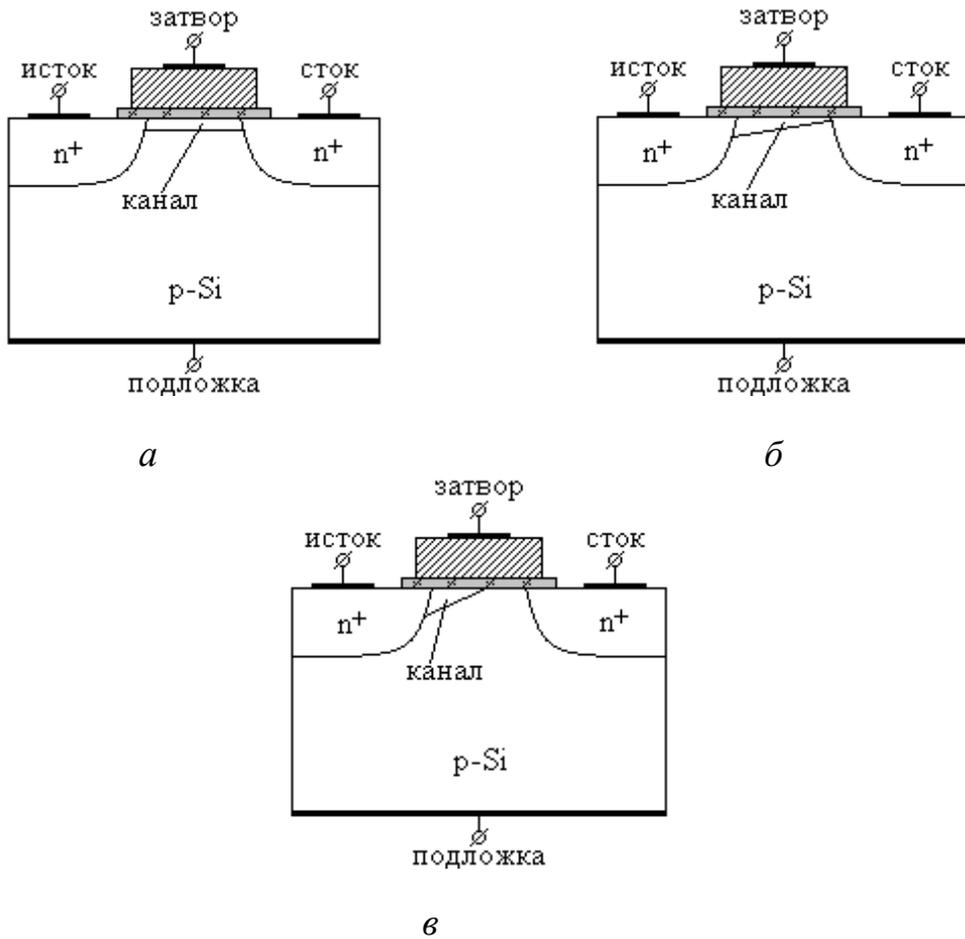


Рис. 1.2. Нормально закрытый n-канальный МОП-транзистор при:  
 а –  $U_{зи} > U_{пор}$  и  $U_{си} = 0$ ; б –  $U_{зи} > U_{пор}$  и  $U_{си} > 0$ ;  
 в –  $U_{зи} > U_{пор}$  и  $U_{си} > U_{насыщ}$

Если на сток подать положительное напряжение, то в цепи сток-исток потечёт ток  $I_{си}$ , величина которого регулируется затворным напряжением  $U_{зи}$ . Так как дополнительно к вертикальному электрическому полю, возникающему при подаче на затвор напряжения относительно подложки, в канале появляется горизонтальное электрическое поле из-за разности потенциалов между стоком и истоком, то толщина канала уменьшается по направлению к стоку (рис. 1.2б). При некотором  $U_{си}$ , называемым напряже-

нием отсечки  $U_{отс}$ , толщина канала у стока станет равной нулю, а при дальнейшем увеличении напряжения  $U_{cu}$  канал будет всё больше укорачиваться (рис. 1.2в). Ток  $I_{cu}$  при этом практически не увеличивается. Область рабочих параметров МОП-транзистора, в которой канал существует от истока до стока, является линейной областью, а область, в которой канал перекрыт, соответствует области насыщения, которая наступает при  $U_{cu} > U_{насыщ}$ .

Аналитические выражения для вольт-амперных характеристик МОП-транзисторов на примере  $n$ -канального нормально закрытого транзистора имеют вид:

$$\begin{aligned}
 & \text{- в линейной области} & I_{cu} &= \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{ox} \left[ (U_{зи} - U_{пор}) U_{cu} - \frac{1}{2} U_{cu}^2 \right]; \\
 & \text{- в области насыщения} & I_{cu} &= \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{ox} \frac{(U_{зи} - U_{пор})^2}{2},
 \end{aligned}$$

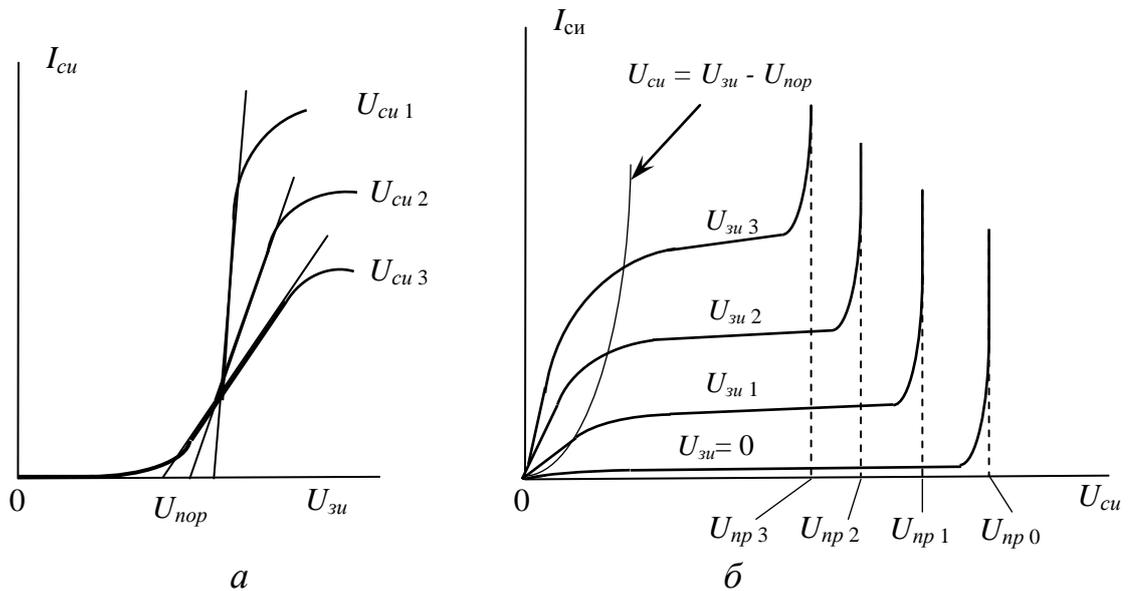
где  $I_{cu}$  – ток стока;  $b_k$  – ширина канала;  $l_k$  – длина канала;  $\mu_n$  – подвижность электронов в канале;  $C_{ox}$  – ёмкость МОП-структуры;  $U_{cu}$  – напряжение на стоке относительно истока;  $U_{зи}$  – напряжение на затворе относительно истока;  $U_{пор}$  – пороговое напряжение МОП-транзистора.

Передаточная характеристика МОП-транзистора представляет собой зависимость тока стока от напряжения на затворе при фиксированном напряжении сток-исток. Типичный вид передаточных характеристик нормально закрытого  $n$ -МОП-транзистора приведён на рисунке 1.3а. По передаточной характеристике можно определить пороговое напряжение и крутизну характеристики транзистора.

Пороговое напряжение определяется как точка пересечения касательной к наиболее линейному участку характеристики (т. е. проведённой через точку перегиба) с осью напряжения на затворе.

Крутизна  $S$  определяется как тангенс угла наклона этой касательной:

$$S = \left. \frac{\partial I_{cu}}{\partial U_{zu}} \right|_{U_{cu} = const}$$



*Рис. 1.3. Вольт-амперные характеристики нормально закрытого n-МОП-транзистора:  
 а – передаточные характеристики при различных напряжениях сток-исток  $U_{cu1} > U_{cu2} > U_{cu3}$ ;  
 б – выходные стоковые характеристики при различных напряжениях на затворе  $U_{zu1} > U_{zu2} > U_{zu3} > U_{nop}$*

Выражение для крутизны можно записать в виде

$$S = \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{ox} U_{cu}$$

Так как крутизна зависит от напряжения сток-исток, то пороговое напряжение, определённое таким способом, также зависит от напряжения сток-исток. Для того чтобы избавиться от зависимости порогового напряжения от напряжения сток-исток  $U_{cu}$ , целесообразно пороговое напряжение определять как напряжение, при котором ток стока достигает какого-либо определённого значения, например, 0,1 мкА.

Выходные вольт-амперные характеристики снимаются при фиксированном напряжении на затворе  $U_{zu}$  и представляют собой зависимость тока стока от напряжения сток-исток  $I_{cu}(U_{cu})$ . Типичные выходные характери-

стики нормально закрытого  $n$ -канального МОП-транзистора представлены на рисунке 1.3б. Перекрытие канала происходит при  $U_{cu} = U_{zu} - U_{nop}$ . Это парабола на рисунке 1.3б, отделяющая линейную область режимов от области насыщения. Напряжение питания транзистора  $U_{num}$  обычно выбирается в области насыщения из-за более высокого значения крутизны  $S$ .

По выходным вольт-амперным характеристикам МОП-транзистора можно определить его сопротивление сток-исток  $R_{cu}$  в закрытом и открытом состоянии:

$$R_{cu} = \left( \frac{\partial I_{cu}}{\partial U_{cu}} \right)^{-1} \Bigg|_{U_{zu} = const} .$$

В закрытом состоянии МОП-транзистора сопротивление  $R_{cu}$  определяется при  $U_{zu} = 0$  или при  $U_{zu} = -U_{num}$ , а в открытом состоянии  $R_{cu}$  МОП-транзистора определяется при напряжении на затворе, гарантирующем его полное открытие, обычно  $U_{zu} = (3 \div 4)U_{nop}$ . Сопротивление  $R_{cu}$  в открытом состоянии МОП-транзистора различается в линейной области при  $U_{cu} \rightarrow 0$  и в области насыщения при  $U_{cu} \rightarrow U_{num}$ . Сопротивление  $R_{cu}$  в области насыщения также называют выходным сопротивлением стока  $R_{вых}$ .

При увеличении  $U_{cu}$  значительную роль начинает играть генерация электронно-дырочных пар путём ударной ионизации атомов кремния в области стокового  $p$ - $n$ -перехода. Скорость генерации  $G_{avalanche}$  определяется выражением

$$G_{avalanche} = \alpha_n n v_n + \alpha_p p v_p ,$$

где  $\alpha_n, \alpha_p$  – коэффициенты ионизации, или умножения, электронов и дырок, зависящие от  $U_{cu}$ ;  $n, p$  – концентрации электронов и дырок;  $v_n, v_p$  – скорости электронов и дырок.

При достижении на стоке пробивного напряжения  $U_{np}$  начинается лавинная генерация носителей заряда из-за ударной ионизации, т. е. происхо-