

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).

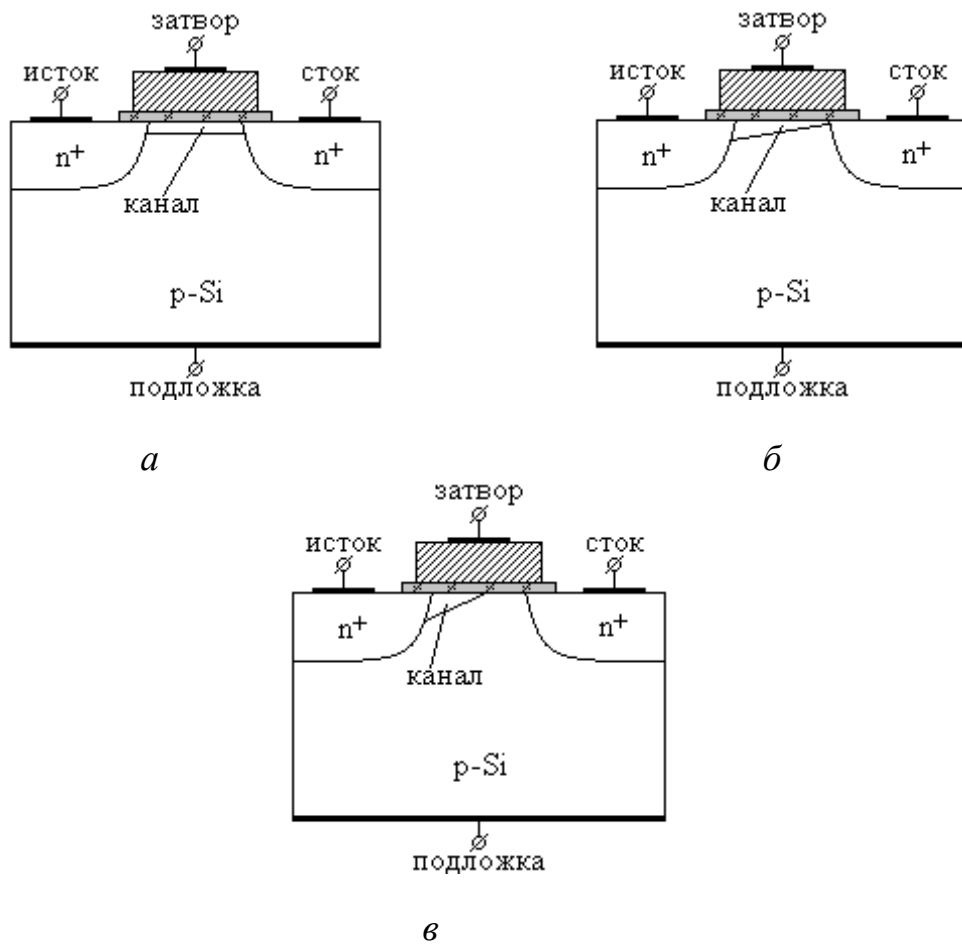


Рис. 1.2. Нормально закрытый n-канальный МОП-транзистор при:
 а – $U_{зи} > U_{пор}$ и $U_{си} = 0$; б – $U_{зи} > U_{пор}$ и $U_{си} > 0$;
 в – $U_{зи} > U_{пор}$ и $U_{си} > U_{насыщ}$

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 $U_{си}$ канал будет всё больше укорачиваться (рис. 1.2в). Ток $I_{си}$ 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 $U_{си} > U_{насыщ}$.

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

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

где $I_{си}$ – ток стока; b_k – ширина канала; l_k – длина канала; μ_n – подвижность электронов в канале; C_{ox} – ёмкость МОП-структуры; $U_{си}$ – 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:

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

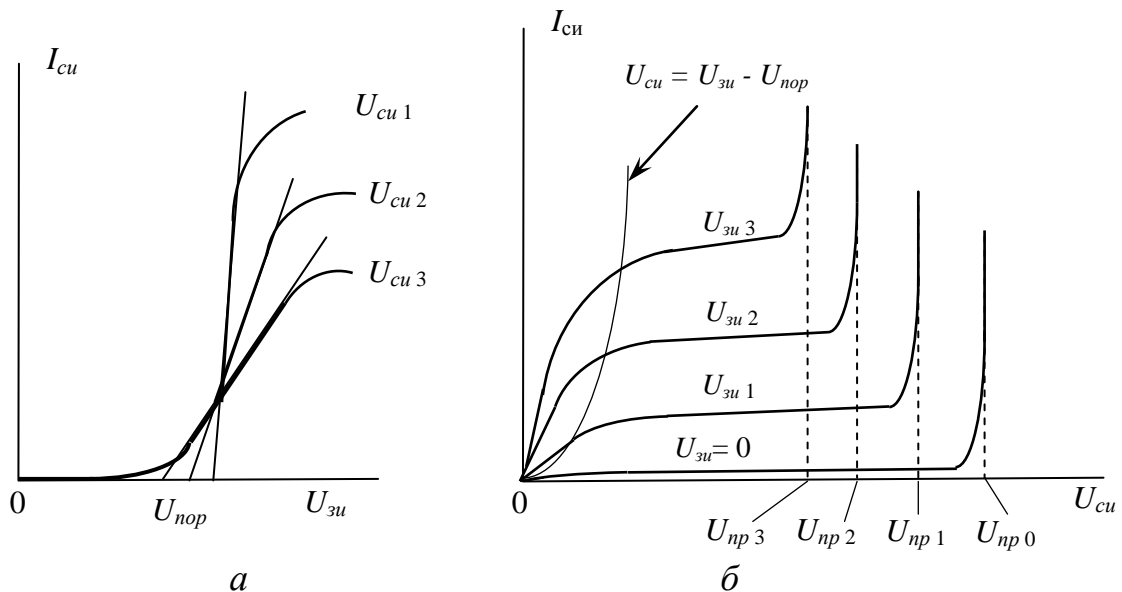


Рис. 1.3. Вольт-амперные характеристики нормально закрытого n-МОП-транзистора:

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 $U_{cu} = U_{zu} - U_{пор}$. 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 $U_{zu} = (3 \div 4)U_{пор}$. 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 α_n, α_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-