

*Ечеистов В.В., студент магистратуры
кафедры «Проектирование и технология
производства электронной аппаратуры»
ФГБОУВО «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»,*

Россия, г. Москва

*Ванройе Н.К., студент магистратуры
кафедры «Проектирование и технология
производства электронной аппаратуры»
ФГБОУВО «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»,*

Россия, г. Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНАРНОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА С ИНДУЦИРОВАННЫМ КАНАЛОМ В СРЕДЕ ANSYS

Аннотация: В данной статье рассмотрен принцип работы планарного МОП-транзистора, а также его структура. Про моделированы статические характеристики МОП транзистора. Исследовано распределение носителей заряда открытого транзистора. В заключении представлены преимущества моделирования полупроводниковых структур над прототипированием.

Ключевые слова: МОП-транзистор, передаточная характеристика, выходные характеристики, программные среды моделирования, моделирование.

SIMULATION OF A PLANAR MOSFET WITH THE INDUCED CHANNEL USING ANSYS

Annotation: *Principles of working and structure were reviewed in the article. This example calculates the DC characteristics of a simple MOSFET. The drain current versus gate voltage characteristics are first computed in order to determine the threshold voltage for the device. Then the drain current vs drain voltage characteristics are computed for several gate voltages. The advantages of modeling were given in conclusion.*

Key words: *MOSFET, transfer characteristics, output characteristics, a software simulation environment, modelling.*

Введение

МОП транзистор на данный момент является самым широко используемым полупроводниковым устройством, представляющим собой главный строительный блок всех процессоров, твердотельной памяти и цифровых ИС. С тех пор, как 40 лет назад был представлен первый микропроцессор, технология изготовления полевых транзисторов прошла впечатляющий эволюционный путь от единиц мкм до десятков нм [1]. Моделирование полевых транзисторов является крайне актуальной задачей на сегодняшний день.

Наблюдается рост потребности в миниатюризации полевых транзисторов в целях применения их в интегральных микросхемах с большей плотностью размещения. Изменение геометрических размеров областей полевого транзистора в сторону уменьшения не может не влиять на его характеристики. например, сужение канала отражается на шероховатости поверхности, что понижает эффективную подвижность в канале. Длина затвора здесь является значимой по причине того, что ее соотношение к геометрической длине канала значительно больше. Сопротивление потерь влияет не только на ток стока, но и на пороговое напряжение. таким образом,

характеристики транзистора необходимо исследовать и улучшать в соответствии с требованиями.

1 МОП-транзистор

МОП-транзистор представляет собой микроминиатюрный переключатель, в котором выходной ток управляется напряжением затвора. На рисунке 1 схематически показана модель простейшего МОП транзистора.

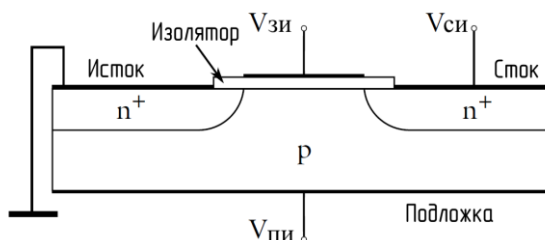


Рисунок 1. Структура МОП-транзистора

Рассмотрим базовые режимы работы полевого транзистора. При малых напряжениях затвора, когда напряжение стока меньше разности напряжения затвора и порогового напряжения ($V_c < (V_z - V_{пор})$) ПТ работает в линейном режиме. Ток стока I_c выражается формулой:

$$I_c = \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C \cdot (V_z - V_{пор}) \cdot V_c \quad (1)$$

где:

W - ширина канала;

L - длина канала;

μ - подвижность носителей;

C - емкость подзатворного диэлектрика.

В линейной области ВАХ представляют прямые, наклон которых зависит от напряжения затвор-исток $U_{зи}$. Минимальное сопротивление канала достигается, когда напряжение $0 U_{зи} =$, так как проводящая часть канала в этом случае имеет наибольшее сечение.

Из соотношения (1), учитывая μ как постоянную величину, проводимость канала (крутизна характеристики):

$$g_m = \frac{\partial I_c}{\partial V_3} |V_c = Const| = \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C \cdot V_c \quad (2)$$

Таким образом, в линейной области полевой транзистор можно использовать как резистор, сопротивление которого регулируется напряжением затвора.

Режим насыщения соответствует насыщению канала основными носителями зарядов. при приложении внешнего напряжения к полупроводниковому каналу, ток в нем линейно зависит от этого напряжения лишь до определенного предела (напряжение насыщения), а по достижении этого предела стабилизируется и остается практически неизменным вплоть до пробоя структуры. Объясняется это тем, что напряжение между затвором и поверхностью канала уменьшается в направлении стока.

После отсечки ($V_c > (V_3 - V_{пор})$) ток стока ПТ:

$$I_c = \frac{W}{2L} \cdot \mu \cdot C \cdot (V_3 - V_{пор})^2 \quad (3)$$

$$g_m = \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C \cdot (V_3 - V_{пор}) = \sqrt{2 \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C \cdot I_c} \quad (4)$$

$$b = \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C \quad (5)$$

где:

μ - подвижность носителей при насыщении;

b - удельная крутизна МОП-транзистора

При данном режиме работы полевого транзистора напряжение, приложенное к затвору перестает влиять на ток стока при превышении им некоторого порогового уровня. При мере уменьшения длины канала ПТ на его работу все больше влияют паразитные факторы, которые делают стандартные стоково-затворные характеристики ПТ неприменимыми для вычислений [2].

При приложении положительного напряжения между стоком и истоком ПТ с индуцированным каналом в канале возникает ток стока. значение тока зависит и от величины напряжения, подаваемого на затвор транзистора, и от напряжения между стоком и истоком. Напряжение на затворе, которое вызывает ток стока - пороговое напряжение.

График передаточной характеристики МОП транзистора с индуцированным каналом представлена на рис.2. Ток стока наблюдается после того, как напряжение на затворе превысит пороговое значение.

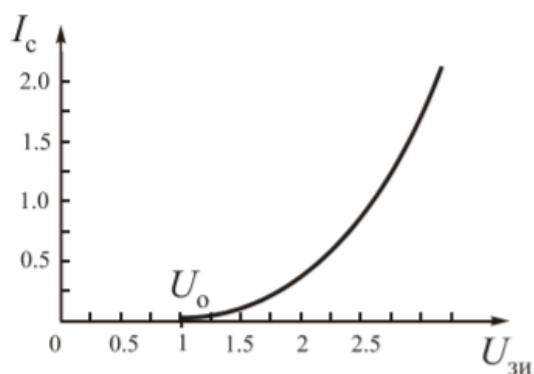


Рисунок 2. Передаточная характеристика МОП транзистора

Выражением (3) аппроксимируется передаточная характеристика МОП транзистора.

Пороговое напряжение $V_{пор}$ - ключевой параметр ПТ при проектировании электронных устройств. Его значение может использоваться при расчете других параметров, таких как геометрические размеры канала и сопротивление канала. Существуют различные методы определения $V_{пор}$ потому что передаточная характеристика вблизи $V_{пор}$ не линейна из-за подпорогового тока.

На рис. 3 представлено семейство выходных характеристик МОП-транзистора с индуцированным каналом.

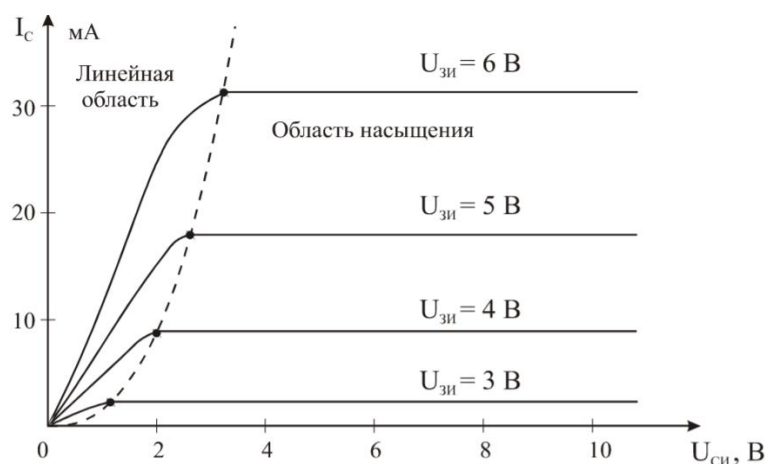


Рисунок 3. Выходные характеристики МОП-транзистора.

С ростом напряжения на затворе, превышающего пороговое, увеличивается и число носителей заряда, втягиваемых в канал электрическим полем. Увеличивается проводимость канала. При невысоком напряжении между стоком и истоком проводимость канала пропорционально зависит от разности напряжений на затворе и порогового напряжения.

По превышении напряжения между стоком и истоком значения насыщения ток в канале перестает расти. В этом случае транзистор находится в режиме насыщения. Причиной этому является направление уменьшения напряжения между затвором и поверхностью канала. В окрестности стока напряжение равно разности $V_{зи} - V_{си}$, а у истока $V_{зи}$. При росте напряжения $V_{си}$ канал сужается в сторону стока, а при превышении им значения напряжения насыщения $V_{нас}$ канал перекрывается и ток стока становится постоянным. При этом различным значениям напряжения затвор-исток соответствуют разные кривые семейства выходных характеристик ПТ.

2 Модель транзистора в пакете ANSYS

Программный пакет ANSYS позволяет в графическом режиме построить топологию транзистора, а затем – определить тип и концентрацию примесей каждой из его областей. На рисунке 4 представлена структура моделируемого транзистора.

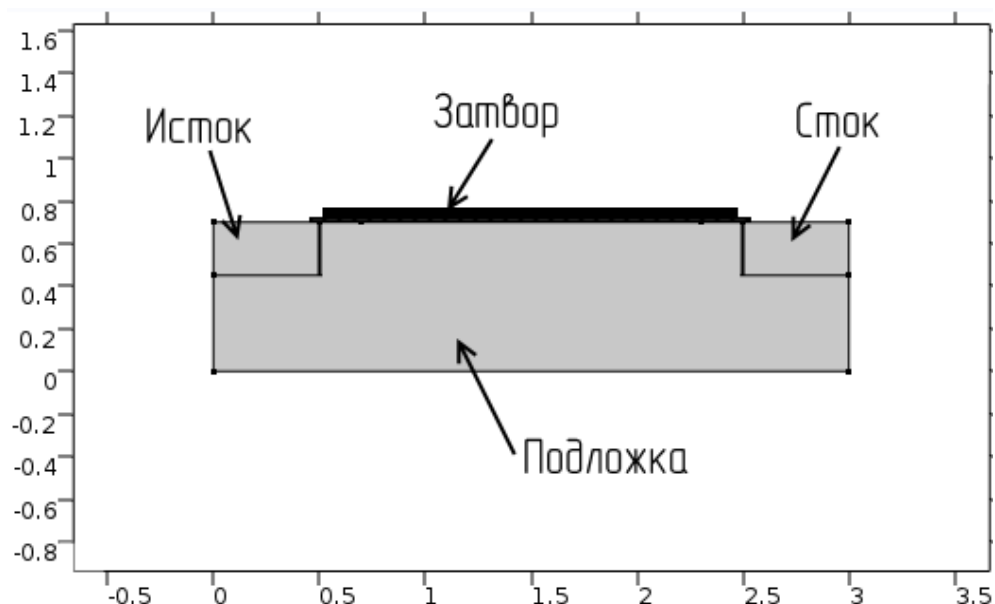


Рисунок 4. Структура модели транзистора в пакете ANSYS

Как видно из рисунка, структура транзистора повторяет структуру с Рисунка 1. По оси абсцисс и ординат даны координаты в мкм. Области истока и стока легированы донорной примесью с концентрацией электронов $N_d = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ у поверхности. Подложка легирована акцепторной примесью с поверхностной концентрацией дырок $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Подзатворный диэлектрик состоит из диоксида кремния и имеет толщину 30 нм. Размер структуры по оси аппликат составляет 1 мкм. Стоит заметить, что для данной конфигурации расчетное пороговое напряжение при $V_{си} = 10 \text{ мВ}$ составляет 1.18В [3], что будет исследовано в дальнейшем посредством моделирования.

3 Моделирование переходных характеристик

В данном эксперименте была промоделирована зависимость тока стока от напряжения затвора (Рисунок 5) при постоянном напряжении стока $V_{си} = 10 \text{ мВ}$

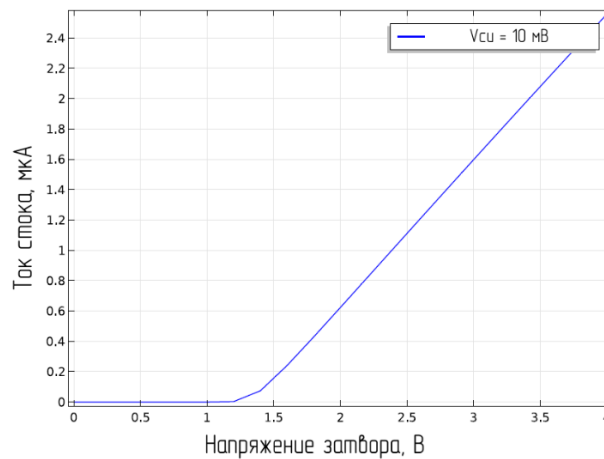


Рисунок 5. Зависимости тока стока от напряжения затвора

Как видно из графика, пороговое напряжение затвора в данном примере составляет около 1.2В, что соответствует теоретическому значению, представленному ранее. При напряжении затвора выше порогового ток стока возрастает линейно.

4 Моделирование выходных характеристик

Исследование выходных характеристик позволяет оценить продолжительность и форму линейной области, а также – границу между линейной областью и областью насыщения. На рисунке 6 представлено семейство зависимостей тока стока от напряжения стока.

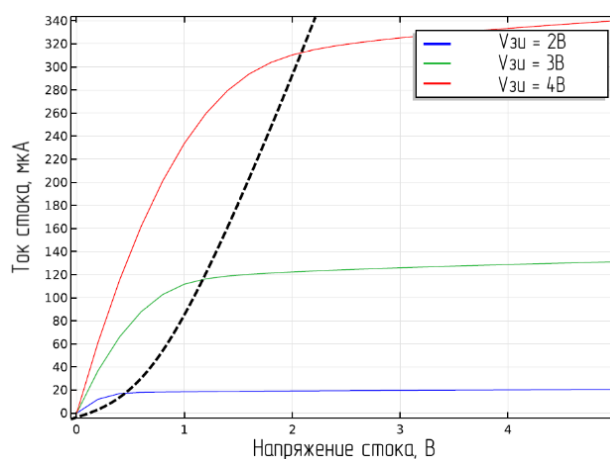


Рисунок 6. Семейство выходных характеристик

Как видно из рисунка, были промоделированы 3 кривые при различных напряжениях затвора: 2В, 3В и 4В. Граница между областями имеет вид параболы (представлена на Рисунке 4 штриховой линией). При двукратном увеличении напряжения затвора замечено 17-кратное увеличение тока насыщения транзистора.

5 Исследование концентрации основных носителей заряда

На Рис. 7 представлена диаграмма пространственного распределения основных носителей заряда при напряжении затвора $V_{зи} = 4В$ и напряжении стока $V_{си} = 5 В$. Цветовая шкала отражает десятичный логарифм концентрации электронов.

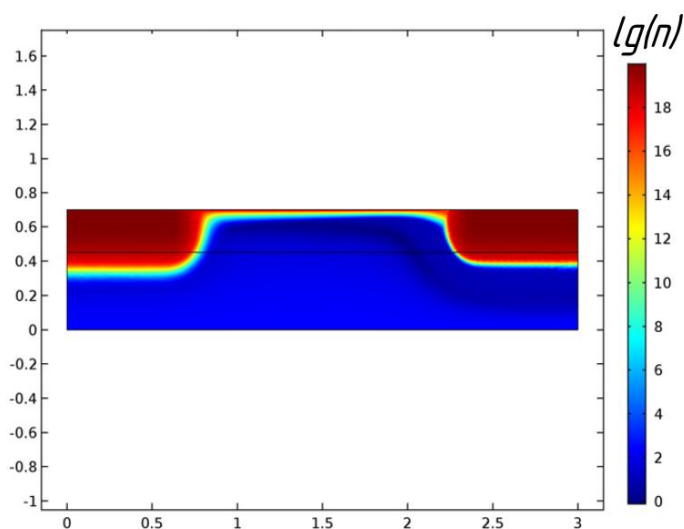


Рисунок 7. Диаграмма концентрации электронов

На диаграмме видны высоколегированные донорной примесью области стока и истока, а также сформированный потенциалом затвора п-канал. Отчетливо виден, так называемый, пинч-эффект, при котором ток канала порождает магнитное поле, сужающее канал по ходу движения основных носителей заряда [4].

Заключение

Микроэлектроника на сегодняшний день не стоит на месте: осваиваются новые проектные нормы, идет непрерывная работа, направленная на поиск нестандартных решений. Отработка производственного процесса такого рода электронных устройств является

крайне важной проблемой. Как вариант решения проблемы может рассматриваться прототипирование, при котором многократно повторяется цикл «Корректировка – производство – исследования», но данный подход требует существенных материальных и временных затрат, притом вовсе не гарантирует успешный результат. Исправить положение позволяет моделирование с использованием программных систем анализа, при котором возможно оценить работоспособность исследуемых транзисторов, их входные и выходные характеристики, пространственную концентрацию носителей заряда при различных режимах работы.

Использованные источники:

1. DC Characteristics of a MOS Transistor (MOSFET). Режим доступа: <https://www.comsol.com/model/dc-characteristics-of-a-mos-transistor-mosfet-14609> (дата обращения 14.01.2017).
2. Jae Woo Lee Electrical Characterization and Modeling of Low Dimensional Nanostructure FET. School of Electrical Engineering Graduate School Korea University, 2012
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х томах, Пер. с англ. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: «Мир», 1993, ISBN 5-03-002337-2, Т. 1-3
4. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 288 с.
5. Goldberg C., Hofstein S.R., Heiman F.P. Pinch off in insulated-gate field-effect transistors. Proceedings of the IEEE, 1964, vol. 52, pp. 414-415. DOI: 10.1109/PROC.1964.2938