

Н. И. ЛЕОНОВ, А. М. ЛЕМЕШЕВСКАЯ, Н. Л. ДУДАР,  
С. Н. ГЕТЬМАН

Беларусь, г. Минск, НПО "Интеграл"  
E-mail: office@bms.by

Дата поступления в редакцию  
16.06 2006 г.

Оппоненты В. С. МАЛЫШЕВ (НПО "Интеграл", г. Минск),  
к. т. н. В. А. МОСКАЛЮК (НТУУ "КПИ", г. Киев)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО $p$ -КАНАЛЬНОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА

*Определены конструкция, удельное сопротивление эпитаксиальной пленки и толщина подзатворного окисла, при которых получены требуемые значения порогового напряжения транзистора.*

При создании современных силовых интегральных микросхем [1, 2] используется разнообразный набор элементов: ДМОП-, КМОП-, биполярные транзисторы, диоды, конденсаторы, резисторы. Чтобы изготовить интегральную схему с заданными свойствами, необходимо получить требуемые параметры вольт-амперных характеристик элементов этой схемы. Все элементы одной схемы формируются в едином технологическом процессе, параметры которого оказывают непосредственное влияние на параметры элементов. Важным и необходимым этапом разработки и оптимизации технологии изготовления новых изделий электронной техники является моделирование полупроводниковых структур с использованием как физических моделей операций, входящих в состав технологического маршрута, так и физических моделей переноса носителей заряда с целью расчета электрических характеристик проектируемого элемента ИС [3, 4].

В данной работе приводятся результаты оптимизационного моделирования операций технологического маршрута и электрических характеристик высоковольтного горизонтального  $p$ -канального МОП-транзистора [5]. Конечная цель исследований состояла в определении параметров технологического маршрута формирования высоковольтного горизонтального  $p$ -канального МОП-транзистора, обеспечивающих пороговое напряжение в диапазоне 0,8—1,8 В, пробивное напряжение сток-исток свыше 80 В и ток стока свыше 0,5 мА в открытом состоянии при напряжении на затворе  $V_3=5$  В.

Моделирование  $p$ МОП-транзистора проводилось с использованием программного пакета компании Silvaco [6] — ведущего на мировом рынке разработчика программных средств, предназначенных для моделирования технологии/прибора/схемы. Моделирование технологического маршрута осуществлялось в среде модуля ATHENA (ядром которого является двумерная программа физического моделирования технологии SSuprem4), а расчет электрических характеристик исследуемого прибора проводился в среде модуля ATLAS (программа S-PISCES).

Для реализации высоковольтного горизонтального  $p$ -канального МОП-транзистора была выбрана конструкция (см. рис. 1), в которой сток и исток сформированы ионной имплантацией примеси бора в эпитаксиальную пленку  $n$ -типа. Сток можно разделить на две области:

- слаболегированная область  $p^-$ -стока;
- сильнолегированная область омического контакта  $p^+$ .

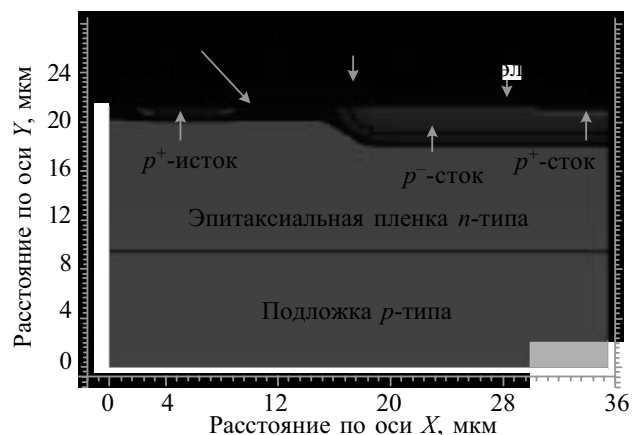


Рис. 1. Распределение примесей по структуре половины ячейки транзистора, полученное в результате моделирования

Область  $p^-$ -стока позволяет снизить напряженность электрического поля вблизи границы затвора и тем самым повысить пробивное напряжение транзистора. Исток формируется ионным легированием бора в эпитаксиальную пленку по маске поликремниевого затвора.

Расчет технологических параметров областей транзистора и режимов формирования этих областей проведен с помощью программы SSuprem4. Исходными данными для расчета являлись заданные значения пробивного напряжения сток-исток транзистора в закрытом состоянии, порогового напряжения в открытом состоянии и тока стока в открытом состоянии.

### Моделирование технологического маршрута изготовления транзистора

Исследуемый технологический маршрут формирования структуры транзистора включает следующие операции:

- 1) осаждение эпитаксиальной пленки  $n$ -типа на подложку  $p$ -типа;

- 2) формирование поликремниевого затвора;
- 3) формирование  $p^-$ -областей стока посредством ионного легирования бором и его последующей разгонки;
- 4) формирование областей истоков и стоков  $p^+$ -типа посредством ионного легирования бором и его последующей разгонки;
- 5) нанесение межслойного окисла и формирование в нем контактных окон;
- 6) напыление металла для формирования контактов к областям.

Результирующая структура горизонтального  $p$ МОП-транзистора показана на рис. 1 (вследствие симметрии достаточно исследовать только половину структуры). На рис. 2 приведено распределение потенциала по структуре половины ячейки транзистора, полученное в результате моделирования для случая, когда затвор транзистора закорочен с его истоком, а между стоком и истоком подается обратное напряжение смещения. Как видно из рис. 2, значение потенциала при подаче обратного напряжения смещения между стоком и истоком транзистора меняется от 0,55 В (наиболее удаленная от области  $p^+$ -стока эквипотенциальная поверхность) до -161,5 В (ближайшая к  $p^+$ -стоку эквипотенциальная поверхность).

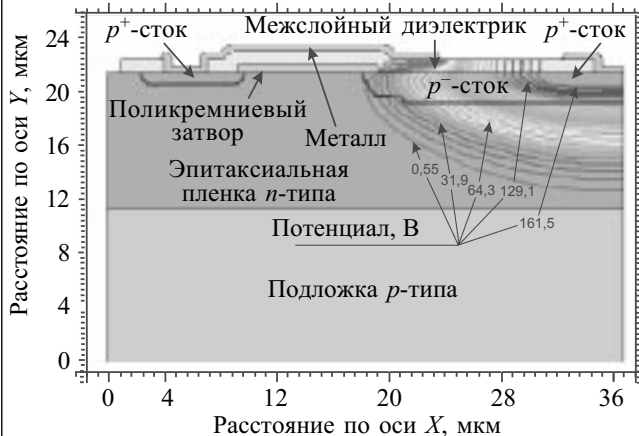


Рис. 2. Распределение потенциала по структуре половины ячейки транзистора, полученное в результате моделирования для случая, когда затвор транзистора закорочен с его истоком, а между стоком и истоком подается обратное напряжение смещения

Одна из целей настоящей работы состояла в получении структуры высоковольтного горизонтального  $p$ МОП-транзистора с величиной порогового напряжения в диапазоне 0,8—1,8 В. Основными технологическими параметрами, определяющими величину порогового напряжения исследуемого транзистора, являются толщина подзатворного окисла и удельное сопротивление  $\rho_v$  эпитаксиальной пленки.

Пороговое напряжение МОП-транзистора определялось из его вольт-амперной характеристики, когда сток транзистора закорочен с его затвором (диодная схема включения транзистора). Результаты расчетов зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения на затворе  $V_3$  с учетом разбросов по толщине подзатворного окисла ( $d=75\pm 5$  нм) и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки ( $\rho_v=1,5\pm 0,225$  Ом·см) приведены на рис. 3.

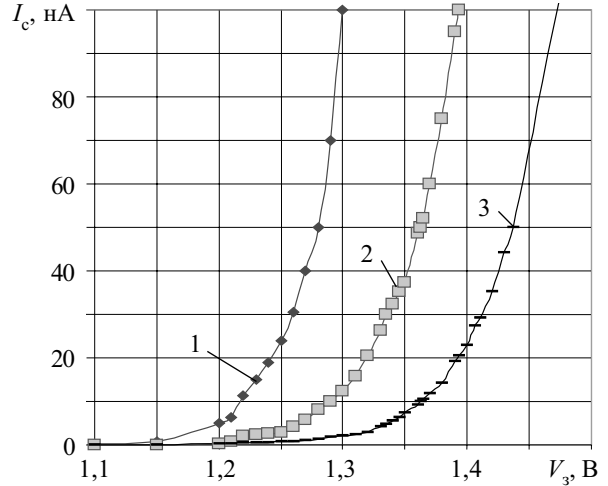


Рис. 3. Графики зависимости тока стока от напряжения на затворе для случая диодного включения  $p$ МОП-транзистора:

- 1 —  $d=70$  нм,  $\rho_v=1,725$  Ом·см; 2 —  $d=75$  нм,  $\rho_v=1,5$  Ом·см;  
3 —  $d=80$  нм,  $\rho_v=1,275$  Ом·см

Пороговое напряжение определялось при токе стока  $I_c=100$  нА, т. к. при этом токе рассматриваемый транзистор можно считать открытым. Как видно из рис. 3, при разбросах по толщине подзатворного окисла и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки значения порогового напряжения  $p$ МОП-транзистора находятся в пределах заданных норм. Графики 1 и 3 представляют собой два крайних случая сочетания технологических параметров: график 1 получен в результате расчетов, когда максимально допустимое значение удельного сопротивления эпитаксиальной пленки ( $\rho_v=1,725$  Ом·см) сочетается с минимально допустимой толщиной подзатворного окисла ( $d=70$  нм), график 3 получен, когда минимально допустимое значение удельного сопротивления эпитаксиальной пленки ( $\rho_v=1,275$  Ом·см) сочетается с максимально допустимой толщиной подзатворного окисла ( $d=80$  нм). График 2 приведен для идеального случая, когда значения толщины подзатворного окисла и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки являются центральными точками промежутков допустимых значений ( $d=75$  нм и  $\rho_v=1,5$  Ом·см).

Как показали расчеты (см. рис. 3), минимальное значение порогового напряжения  $\approx 1,3$  В получено при сочетании максимально допустимого значения удельного сопротивления эпитаксиальной пленки ( $\rho_v=1,725$  Ом·см) с минимально допустимой толщиной подзатворного окисла ( $d=70$  нм), а максимальное значение порогового напряжения  $\approx 1,47$  В достигается при сочетании минимально допустимого значения удельного сопротивления эпитаксиальной пленки ( $\rho_v=1,275$  Ом·см) с максимально допустимой толщиной подзатворного окисла ( $d=80$  нм). Для идеального (с точки зрения воспроизводимости технологического процесса) случая, когда значения толщины подзатворного окисла и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки являются центральными точками допустимых значений ( $d=75$  нм и  $\rho_v=1,5$  Ом·см), пороговое напряжение транзистора составляет  $\approx 1,39$  В (см. график 2 на рис. 3).

Расчеты показали, что полная активная структура высоковольтного горизонтального  $p$ МОП-транзистора с постоянным током стока в открытом состоянии свыше 0,5 мА имеет площадь  $\approx 37 \times 67$  мкм<sup>2</sup>. Результаты моделирования получены для половины структуры транзистора с шириной канала  $W=1$  мкм. Полная структура  $p$ МОП-транзистора имеет ширину канала 100 мкм. Следовательно, величину тока стока, протекающего через данный транзистор в диодном включении при заданном напряжении на затворе, можно получить, умножив значение тока стока половины структуры на 100, т. к. с увеличением ширины канала ток стока увеличивается. На рис. 3 представлены данные моделирования для полноразмерной структуры  $p$ МОП-транзистора.

### Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования

На основании результатов моделирования был разработан технологический маршрут изготовления высоковольтного горизонтального  $p$ МОП-транзистора с пробивным напряжением сток-исток свыше 80 В. Получены экспериментальные образцы и измерены их вольт-амперные характеристики. В процессе изготовления экспериментальных образцов  $p$ МОП-транзистора был проведен эксперимент как по толщине подзатворного окисла, так и по удельному сопротивлению эпитаксиальной пленки. Эксперимент проводился с учетом стандартности технологических операций серийного производства, т. е. использовались только стандартные значения удельного сопротивления эпитаксиальной пленки и толщины подзатворного окисла. Часть экспериментальных образцов была изготовлена на эпитаксиальной пленке с  $\rho_v=1,5$  Ом·см и часть — на эпитаксиальной пленке с  $\rho_v=2,0$  Ом·см. В свою очередь, часть образцов, полученных на эпитаксиальной пленке с  $\rho_v=1,5$  Ом·см, имела толщину подзатворного окисла 60 нм и часть — толщину 75 нм. Аналогичная ситуация была и у образцов, полученных на эпитаксиальной пленке с  $\rho_v=2,0$  Ом·см.

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики (зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения на затворе  $V_g$ ), как полученные при моделировании (графики 1—3), так и измеренные на пяти экспериментальных образцах (графики а—д). Наиболее близкими к результатам моделирования оказались те экспериментальные образцы, которые были изготовлены в эпитаксиальной пленке с удельным сопротивлением  $\rho_v=1,5$  Ом·см и имели толщину подзатворного окисла 75 нм. Повышение удельного сопротивления эпитаксиальной пленки приводит к понижению пороговых напряжений горизонтального  $p$ МОП- транзистора, увеличение толщины подзатворного окисла ведет к повышению его пороговых напряжений.

Графики а—д на рис. 4 мало отличаются друг от друга. Пороговые напряжения, полученные на экспериментальных образцах, превышают пороговые напряжения, полученные в результате моделирования, в среднем на 0,2 В и находятся в пределах промежутка требуемых значений. Поэтому для получения структуры исследуемого горизонтального высоковольтного  $p$ МОП-транзистора может быть использован технологический маршрут, в котором в процессе

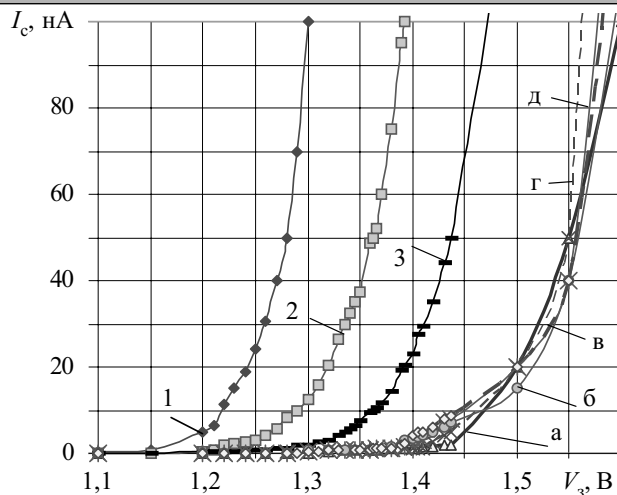


Рис. 4. Графики зависимости тока стока от напряжения на затворе для случая диодного включения  $p$ МОП-транзистора:

1—3 — графики, полученные при моделировании (см. рис. 3); а—д — соответствуют измерениям ВАХ на экспериментальных образцах

эпитаксии выращиваются пленка  $n$ -типа с удельным сопротивлением 1,5 Ом·см и подзатворный окисел толщиной 75 нм.

При изготовлении высоковольтного  $p$ МОП-транзистора следует использовать подзатворный окисел толщиной 75 нм, а не 60 нм. Это связано с тем, что при высокотемпературных операциях разгонки примесей, используемых при изготовлении элементной базы высоковольтных микросхем, имеет место диффузия фосфора из поликремниевого затвора через подзатворный окисел в область канала транзистора, и чем больше толщина подзатворного окисла, тем менее вероятно попадание фосфора в область канала через него.

### Заключение

Результаты моделирования и экспериментального исследования технологии формирования высоковольтного горизонтального  $p$ -канального МОП-транзистора показали, что удельное сопротивление эпитаксиальной пленки  $n$ -типа 1,5 Ом·см и толщина подзатворного окисла 75 нм позволяют получить допустимый уровень порогового напряжения исследуемого  $p$ МОП- транзистора.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Флоренцев С. Тенденции развития приборов силовой электроники // Электронные компоненты. — 2004. — № 8. — С. 127—136.
2. Лоренц Л. Состояние и направления дальнейшего развития в сфере разработки производства и применения силовых полупроводниковых приборов // Электротехника. — 2001. — № 12. — С. 2—12.
3. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема. — М.: Радио и связь, 1988.
4. Блюхер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. — М.: Мир, 1984.
6. <http://www.silvaco.com>