

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^+ .

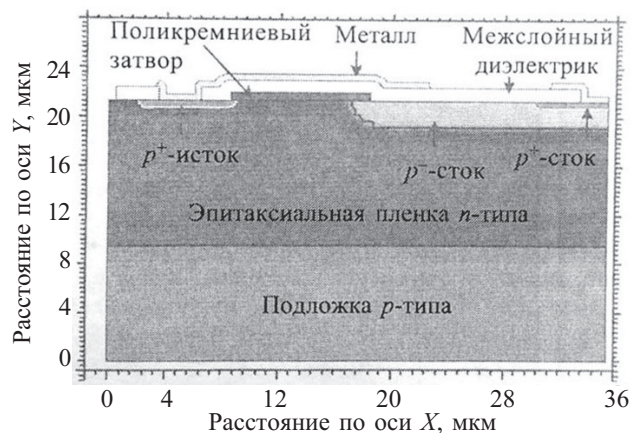


Рис. 1. Распределение примесей по структуре половины ячейки транзистора, полученное в результате моделирования

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 поликремниевых затворов.

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).

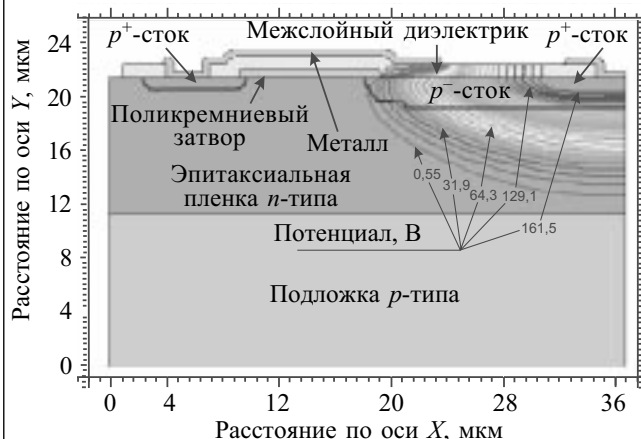


Рис. 2. Распределение потенциала по структуре половины ячейки транзистора, полученное в результате моделирования для случая, когда затвор транзистора закорочен с его истоком, а между стоком и истоком подается обратное напряжение смещения

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 ρ_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.

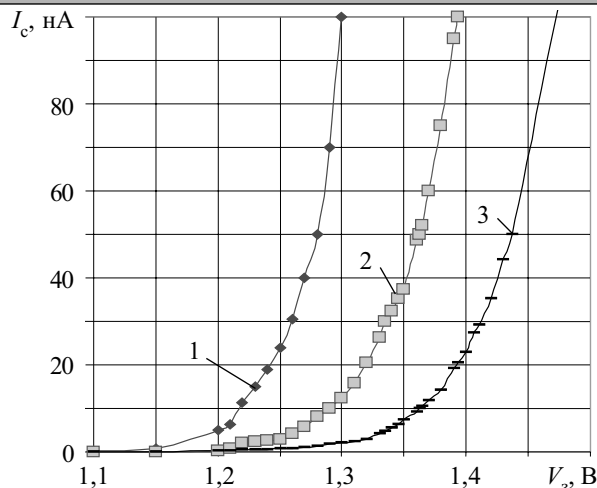


Рис. 3. Графики зависимости тока стока от напряжения на затворе для случая диодного включения p МОП-транзистора:

- 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 $\approx 37 \times 67$ мкм². 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_3), 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

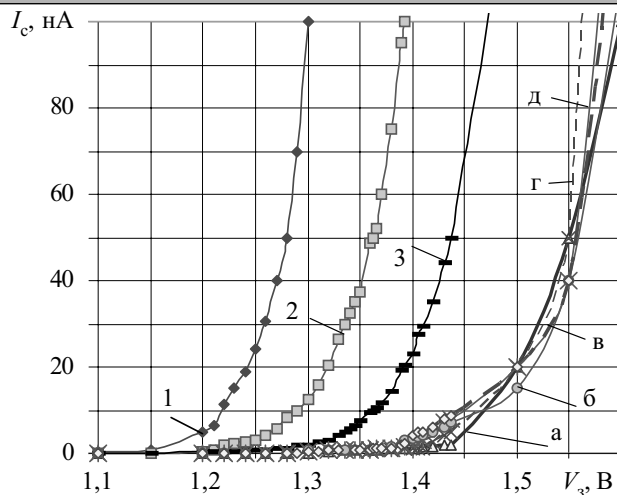


Рис. 4. Графики зависимости тока стока от напряжения на затворе для случая диодного включения p МОП-транзистора:

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>