

# Комбинированная методика двумерного моделирования технологии и электрофизических параметров МОП-транзисторов

*А. С. Черкаев, С. В. Калинин, Е. А. Макаров*

В данной работе была предложена новая комбинированная методика калибровки параметров двумерных технологических и электрофизических моделей пакета приборно-технологического моделирования «MicroTec-3.02». Такая калибровка осуществляется на основе высокоточных одномерных профилей легирования в канале и исток-стоках МОП-транзисторов, рассчитанных ППП «ФАКТ», и реально измеренных вольт-амперных характеристиках исследуемых приборов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире основным средством проектирования элементной базы интегральных микросхем (ИМС) [1] является мощная технологическая САПР «SenTaurus» компании Synopsys [2]. Данный пакет программ отличается высокой точностью моделирования двумерных и трёхмерных полупроводниковых структур. Но вместе с тем, он достаточно сложен в использовании и, что более существенно, его промышленная версия стоит очень дорого. По этой причине «SenTaurus» практически недоступен для российских разработчиков ИМС.

В нашем регионе промышленным стандартом технологического моделирования остаётся пакет прикладных программ (ППП) «ФАКТ» [3]. Наряду с «ФАКТОМ», для этих целей может быть использована широко распространённая в России учебная программа «MicroTec-3.02» [4, 5]. «ФАКТ» характеризуется высокой точностью, но область моделирования в нём одномерная, и поэтому он не обеспечивает расчёт вольтамперных характеристик (ВАХ) приборов. «MicroTec-3.02» – двумерный пакет, позволяющий рассчитывать ВАХ, но его параметры технологических и электрофизических моделей требуют корректировки под конкретный технологический процесс.

В программе «MicroTec-3.02», значения параметров физических моделей, характеризующих процессы термического окисления, ионной имплантации, диффузии (основные технологические операции изготовления ИМС), а также моделей, описывающих электрофизические свойства полупроводниковых структур, доступны для редактирования пользователем. Таким образом, имеется возможность калибровки параметров соответствующих моделей,

в частности, коэффициента диффузии, энергии активации легирующих примесей (бор, фосфор, мышьяк), коэффициента лавинной ионизации для электронов и дырок на основе дополнительной информации о реальных профилях легирования и реально измеренных ВАХ исследуемых МОП-транзисторов.

## 2. КАЛИБРОВКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для моделирования был выбран технологический маршрут изготовления n-канальных МОП-транзисторов. В зависимости от дозы ( $D$ ) имплантации легирующей примеси в канале, а также от ширины ( $W$ ) и длины ( $L$ ) самого канала, было рассмотрено несколько вариантов данного прибора:

1)  $W/L = 25/10$  [мкм/мкм].

Режим ИЛ:  $E = 50$  кэВ;  $D = 0,12$  мкКл/см<sup>2</sup>.  
ВАХ:  $U_{пор} = 0,8 \pm 0,2$  В;  $U_{np0} = 24 \pm 2$  В.

2)  $W/L = 110/5$  [мкм/мкм].

Режим ИЛ:  $E = 50$  кэВ;  $D = 0,12$  мкКл/см<sup>2</sup>.  
ВАХ:  $U_{пор} = 0,8 \pm 0,2$  В;  $U_{np0} = 20 \pm 2$  В.

3)  $W/L = 25/8$  (а) [мкм/мкм].

Режим ИЛ:  $E = 50$  кэВ;  $D = 0,5$  мкКл/см<sup>2</sup>.  
ВАХ:  $U_{пор} = 2,5 \pm 0,5$  В;  $U_{np0} = 24 \pm 2$  В.

4)  $W/L = 25/8$  (b) [мкм/мкм].

Режим ИЛ:  $E = 50$  кэВ;  $D = 0,5$  мкКл/см<sup>2</sup>.  
ВАХ:  $U_{пор} = 2,5 \pm 0,5$  В;  $U_{np0} = 18 \pm 2$  В.

5)  $W/L = 50/8$  [мкм/мкм].

Режим ИЛ:  $E = 50$  кэВ;  $D = 0,5$  мкКл/см<sup>2</sup>.  
ВАХ:  $U_{пор} = 2,5 \pm 0,5$  В;  $U_{np0} = 24 \pm 2$  В.

Данные транзисторы изготавливаются по самосовмещённой технологии с поликремниевым затвором на подложке КДБ-20 (концентрация бора  $6,7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>) с ориентацией <100>.

В пакете «MicroTec-3.02» двумерное моделирование технологии осуществляется программой «SiDif». Соответствующий исследуемым приборам технологический маршрут был рассчитан в ППП «ФАКТ» и «SiDif».

Следует отметить, что при моделировании учитывались только высокотемпературные операции (выше 800°C), так как они разгоняют примесь и непосредственным образом влияют на профили легирования, что, в свою очередь, меняет электрофизические параметры приборов.

Для сравнения результатов моделирования использовались два профиля: распределение фосфора в области истока (стока) и распределение бора в области канала. На рис. 1 представлены расчётные кривые для профиля распределения фосфора в области истока (стока) в полулогарифмическом масштабе.

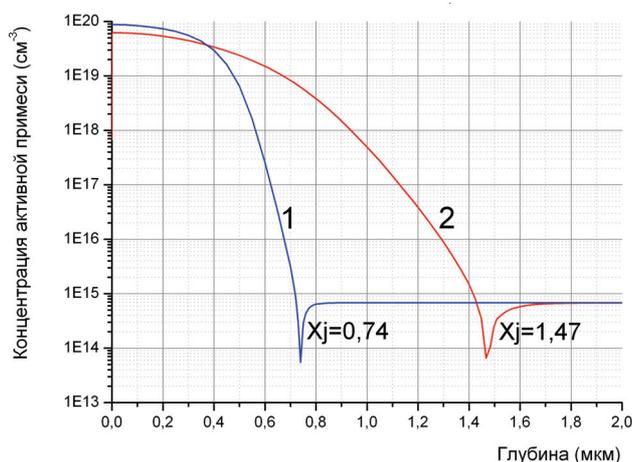


Рис. 1. Профиль распределения фосфора в области И (С).  
1 – кривая, рассчитанная «SiDif» ( $E_{0P} = 3,66$  эВ).  
2 – кривая, рассчитанная «ФАКТ».

Кривая 1 получена моделированием в программе «SiDif» с параметрами технологических моделей, установленными по умолчанию. Кривая 2 рассчитана ППП «ФАКТ» и взята в качестве эталонной.

Как показывает рис. 1, различие в глубине залегания  $p$ - $n$ -перехода составляет примерно 0,7 мкм. Это подтверждает тот факт, что технологические модели пакета «Micro-Tec-3.02» действительно требуют корректировки под конкретный технологический процесс.

Основной физической величиной, влияющей на распределение примеси в процессе термических операций, является коэффициент диффузии. В программе «SiDif» коэффициент диффузии фосфора для вакансионного механизма описывается выражением [5]

$$D_p = D_{0P} \exp\left(\frac{-E_{0P}}{kT}\right) + D_{1P} \left(\frac{n}{n_i}\right) \exp\left(\frac{-E_{1P}}{kT}\right) + D_{2P} \left(\frac{n}{n_i}\right)^2 \exp\left(\frac{-E_{2P}}{kT}\right),$$

где  $D_{0P}$  – собственный коэффициент диффузии фосфора;  
 $E_{0P}$  – собственная энергия активации фосфора;  
 $D_{1P}$ ,  $E_{1P}$ ,  $D_{2P}$ ,  $E_{2P}$  – коэффициенты диффузии и энергии активации фосфора в присутствии одно- и двукратноотрицательно заряженных вакансий соответственно.

В качестве калибровочного параметра была выбрана собственная энергия активации  $E_{0P}$ . По умолчанию,  $E_{0P} = 3,66$  эВ.

В результате множественных расчётов оказалось, что для точного совпадения результатов работы двух программ следует использовать значение энергии активации фосфора на 0,2 эВ меньше первоначального  $E_{0P} = 3,455$  эВ  $\pm 1\%$ . Соответствующий этому значению профиль распределения представлен на рис. 2.

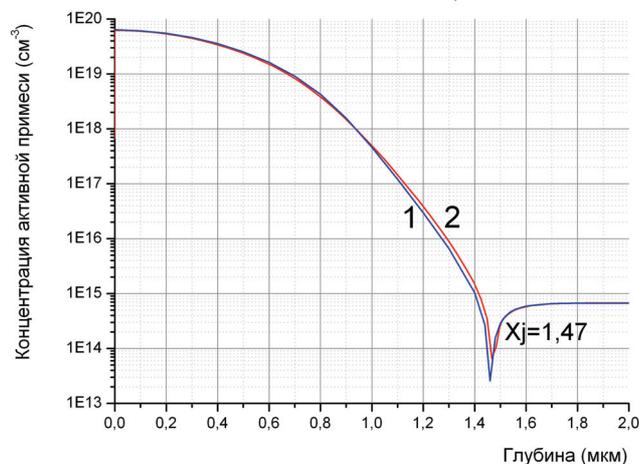


Рис. 2. Профиль распределения фосфора в области И (С). 1 – кривая, рассчитанная «SiDif» ( $E_{0P} = 3,46$  эВ). 2 – кривая, рассчитанная «ФАКТ».

Аналогичным образом производилась корректировка коэффициента диффузии для бора, который описывается выражением [5]

$$D_B = D_{0B} \exp\left(\frac{-E_{0B}}{kT}\right) \left(\frac{1 + \beta\eta}{1 + \beta}\right),$$

где  $D_{0B}$  – собственный коэффициент диффузии бора;  
 $E_{0B}$  – собственная энергия активации бора;  
 $\beta = 3$ ;  $\eta = p/n_i$ .

Значение энергии активации для этого вида примеси  $E_{0B} = 3,31$  эВ, что на 0,11 эВ меньше установленного по умолчанию  $E_{0B} = 3,42$  эВ.

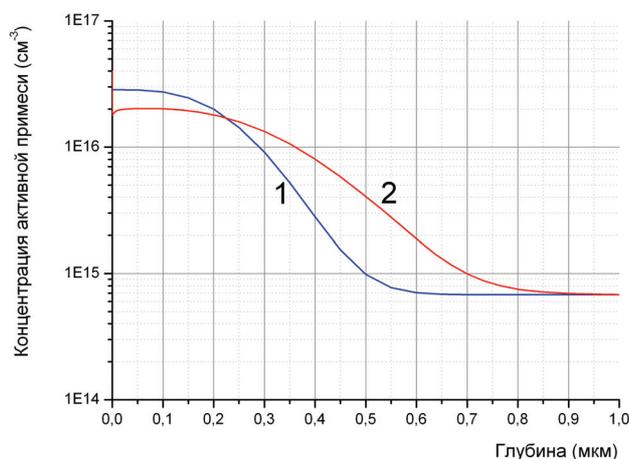


Рис. 3. Профиль распределения бора в области канала.  
1 – кривая, рассчитанная «SiDif» ( $E_{0B} = 3,42$  эВ).  
2 – кривая, рассчитанная «ФАКТ».

На рис. 3 показан профиль распределения бора в области канала для одного из режимов ионного легирования (ИЛ). Кривая 1 получена моделированием в программе

«SiDif» с параметрами технологических моделей, установленными по умолчанию. Кривая 2 рассчитана ППП «ФАКТ». Как видно из рисунка, различие в глубине залегающей примеси составляет примерно 0,2 мкм.

Этот же профиль, соответствующий скорректированному значению собственной энергии активации бора, показан на рис. 4.

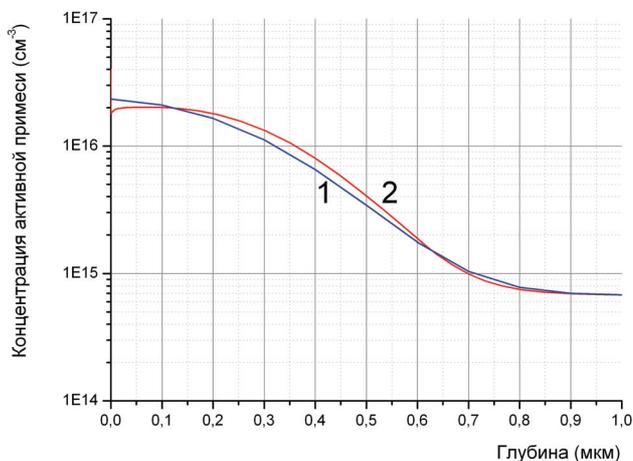


Рис. 4. Профиль распределения бора в области канала.  
1 – кривая, рассчитанная «SiDif» ( $E_{0B} = 3,31$  эВ).  
2 – кривая, рассчитанная «ФАКТ».

### 3. КАЛИБРОВКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Двумерное электрофизическое моделирование полупроводникового прибора в пакете «MicroТес-3.02» осуществляется программой «SemSim». Рассчитанные и откалиброванные ранее профили легирования для областей исток-стоков и канала передаются в оболочку «MergIC», где происходит их объединение и формирование структуры МОП-транзистора, а затем в «SemSim» для расчёта ВАХ.

Поперечное сечение двумерной структуры транзистора № 2 ( $W/L = 110/5$ ) [ $U_{пор} = 0,8 \pm 0,2$  В;  $U_{np0} = 20 \pm 2$  В] представлено на рис. 5.

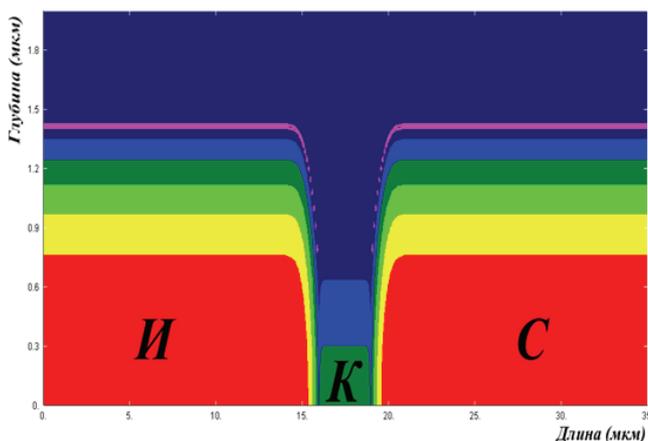


Рис. 5. Транзистор № 2 ( $W/L = 110/5$ ). Двумерный профиль распределения активной примеси.  
«И» – Исток. «С» – Сток.  
«К» – Легированный бором канал.

На рис. 6 показана соответствующая структуре транзистора № 2 передаточная вольт-амперная характеристика, рассчитанная в программе «SemSim».

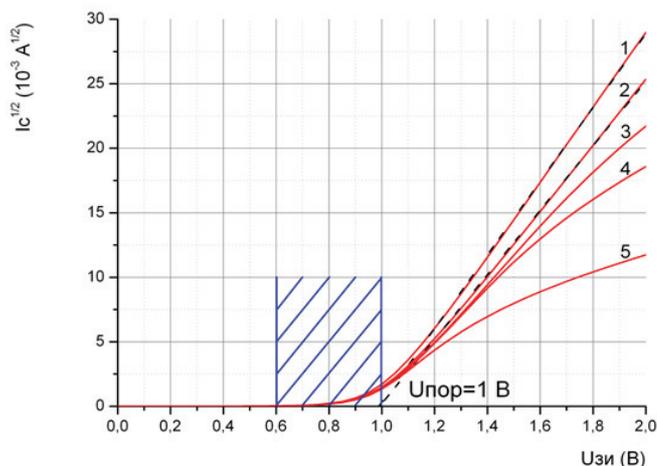


Рис. 6. Транзистор № 2 ( $W/L = 110/5$ ). Зависимость корня тока стока от напряжения затвор-исток.  
1 –  $U_{cu} = 10$  В; 2 –  $U_{cu} = 3$  В; 3 –  $U_{cu} = 0,5$  В;  
4 –  $U_{cu} = 0,3$  В; 5 –  $U_{cu} = 0,1$  В.

На графике приведено экстраполированное значение порогового напряжения, равное 1 В, а также указан диапазон ( $0,8 \pm 0,2$  В) реально измеренных пороговых напряжений для данного прибора.

Коэффициенты  $A_n, B_n, A_p, B_p$  по умолчанию имеют следующие значения:

$$A_n = 7 \cdot 10^5 \text{ 1/см}; \quad A_p = 4,4 \cdot 10^5 \text{ 1/см};$$

$$B_n = 1,4 \cdot 10^6 \text{ В/см}; \quad B_p = 1,4 \cdot 10^6 \text{ В/см}.$$

После анализа экспериментальных данных по коэффициентам лавинной ионизации, опубликованных различными авторами, была произведена их корректировка:

$$A_n = 2,2 \cdot 10^6 \text{ 1/см}; \quad A_p = 1 \cdot 10^6 \text{ 1/см};$$

$$B_n = 1,54 \cdot 10^6 \text{ В/см}; \quad B_p = 1,66 \cdot 10^6 \text{ В/см}.$$

Соответствующая этим коэффициентам выходная ВАХ представлена на рисунке 7.

Реально измеренные значения пробивных напряжений моделируемого МОП-транзистора лежат в диапазонах, обозначенных на рисунке 7 заштрихованными областями, правая из которых ( $U_{cu} = 20 \pm 2$  В) соответствует напряжению прямого пробоя стокового перехода на подложку ( $U_{зи} = 0$  В), а левая ( $U_{cu} = 14 \pm 1$  В) служит для контроля пробивных напряжений при открытом канале ( $U_{зи} \geq 4$  В).

Как видно из представленных на рис. 6 и 7 характеристиках, результаты расчётов хорошо совпадают с экспериментальными данными.

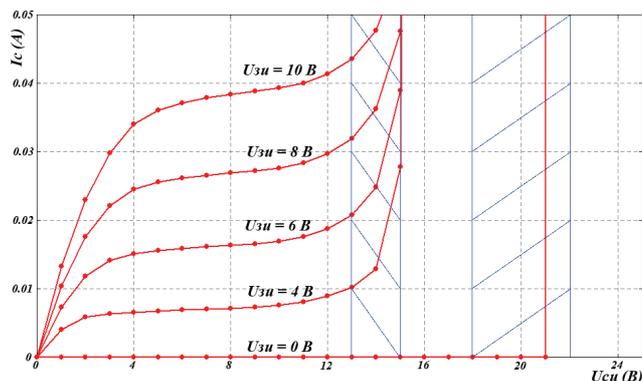


Рис. 7. Транзистор № 2 ( $W/L = 110/5$ ). Выходная ВАХ

Главным параметром, определяющим напряжение пробоя МОП-транзистора, является коэффициент лавинной ионизации  $\alpha$ . Процесс лавинной ионизации в «SemSim» смоделирован с помощью известной модели Чиновета [5]

$$\alpha_i = A_i \exp\left(\frac{-B_i}{E}\right),$$

где  $A_i$  и  $B_i$  – параметры;

$E$  – напряжённость электрического поля;

$i$  – индекс ( $n$  – для электронов,  $p$  – для дырок).

Коэффициенты  $A_n, B_n, A_p, B_p$  по умолчанию имеют следующие значения:

$$A_n = 7 \cdot 10^5 \text{ 1/см}; \quad A_p = 4,4 \cdot 10^5 \text{ 1/см};$$

$$B_n = 1,4 \cdot 10^6 \text{ В/см}; \quad B_p = 1,4 \cdot 10^6 \text{ В/см}.$$

После анализа экспериментальных данных по коэффициентам лавинной ионизации, опубликованных различными авторами, была произведена их корректировка:

$$A_n = 2,2 \cdot 10^6 \text{ 1/см}; \quad A_p = 1 \cdot 10^6 \text{ 1/см};$$

$$B_n = 1,54 \cdot 10^6 \text{ В/см}; \quad B_p = 1,66 \cdot 10^6 \text{ В/см}.$$

Соответствующая этим коэффициентам выходная ВАХ представлена на рисунке 7.

Реально измеренные значения пробивных напряжений моделируемого МОП-транзистора лежат в диапазонах, обозначенных на рисунке 7 заштрихованными областями. Правая из них ( $U_{cu} = 20 \pm 2$  В) соответствует напряжению прямого пробоя стокового перехода на подложку ( $U_{zu} = 0$  В), а левая ( $U_{cu} = 14 \pm 1$  В) служит для контроля пробивных напряжений при открытом канале ( $U_{zu} \geq 4$  В).

Как видно из представленных на рис. 6 и 7 характеристик, результаты расчётов хорошо совпадают с экспериментальными данными.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной работе предложена новая комбинированная методика калибровки параметров двумерных технологических моделей пакета приборно-технологического моделирования «MicroTec» на основе высокоточных одномерных профилей легирования в канале и истоках МОП-транзисторов, рассчитанных ППП «ФАКТ».
2. Показано, что путём решения обратной задачи о нахождении физических параметров моделей по известным профилям легирования удастся значительно повысить точность технологических расчётов программы «MicroTec».
3. В ходе работы были определены технологические диапазоны энергии активации фосфора и бора для диффузии в кремнии, используемые в программе двумерного технологического моделирования «SiDif».
4. На основе описанного подхода были определены и уточнены коэффициенты лавинного умножения для электронов и дырок, используемые в программе двумерного моделирования полупроводникового прибора «SemSim».
5. Также были исследованы и промоделированы параметры и характеристики нескольких МОП-транзисторов, используемых в реально проектируемых ИМС, разрабатываемых ФГУП «НПП «Восток».

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают свою благодарность Михаилу С. Обрехту за предоставленную возможность использования учебной версии пакета приборно-технологического моделирования «MicroTec-3.02».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов; Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема; М.: Радио и связь, 1988 г
2. <http://www.synopsys.com>
3. ППП «ФАКТ» – РИ ЛАРС 01.02.08-00 ФГУП «НПП «Восток».
4. <http://www.siborg.ca>
5. Obrecht M. S.; «Software Package for Two-Dimensional Process and Device Simulation – MICROTREC-3.02. User's Manual»; Siborg, Waterloo, Can., 1998.

#### Черкаев Алексей Сергеевич

магистрант второго года обучения факультета радиотехники, электроники и физики Новосибирского государственного технического университета,  
e-mail: [alex\\_agent40deg@mail.ru](mailto:alex_agent40deg@mail.ru)

#### Калинин Сергей Васильевич

доцент кафедры технической электроники СибГУТИ, тел. 269-82-55, e-mail: [kalinin55@yandex.ru](mailto:kalinin55@yandex.ru)

#### Макаров Евгений Афанасьевич

доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета, тел. 346-08-75,  
e-mail: [makarov@amber.ref.nstu.ru](mailto:makarov@amber.ref.nstu.ru)