

# Разработка и моделирование субмикронных PDCFET транзисторов

А.А. Краснюк<sup>1,3</sup>, О.М. Орлов<sup>2</sup>, Э.Ф. Имамединов<sup>1</sup>, Е.В. Марьина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ

<sup>2</sup>ОАО «НИИМЭ и Микрон»

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,

[aakr@cs.niisi.ras.ru](mailto:aakr@cs.niisi.ras.ru)

**Аннотация** — Предложена модель для характеристики субмикронных полевых транзисторов с периодически легированным каналом PDCFET. Показано улучшение характеристик за счет геометрического фактора уменьшения эффективной длины.

**Ключевые слова** — МДП транзисторы, периодически легированный канал, TCAD – модель, самоформирующиеся наноструктуры.

## I. ВВЕДЕНИЕ

КМОП СБИС по технологическим нормам 0,18 - 0,25 мкм позволяют создавать высоконадежную и сбоеустойчивую электронную компонентную базу для промышленных и авиакосмических приложений.

Однако производительность данных микросхем, как правило, существенно уступает коммерческим изделиям, изготовленным по суб-100нм технологическим нормам. Представляются актуальными задачи совершенствования конструкции субмикронных транзисторов, которые бы позволили повысить быстродействие КМОП и КНИ КМОП СБИС при сохранении высоких характеристик надежности, долговечности и сбоеустойчивости.

Одним из возможных путей решения данной задачи является разработка и применение в стойких схемах МДП транзисторов с периодически легированным каналом [1,4]. МДП транзисторы с периодически легированным каналом (PDCFET) в первом приближении могут рассматриваться как N короткоканальных транзисторов, имеющих общий затвор. Благодаря высокой проводимости областей легирования в канале общая эффективная длина канала уменьшается за счет геометрического фактора

$$\alpha = \frac{d}{L_i},$$

определяемом как отношение шага легирования  $d$  к расстоянию между легированными областями  $L_i$  (рис. 1). Это и позволяет предположить, что

усилительные и высокочастотные свойства транзистора могут быть пропорционально улучшены. Данный подход известен для НЕМТ транзисторов [2], однако его применение для КМОП структур имеет существенные отличия по сложности формирования периодически легированного канала.

## II. МОДЕЛИ И ОПИСАНИЕ PDCFET ТРАНЗИСТОРОВ

Как показано на рис. 1 [1] при моделировании предполагалось рассмотрение канала транзистора как совокупность N секций. Предположим, что выполняются следующие традиционные для МДП транзисторов приближения:

- приближение плавного канала;
- приближение полного обеднения (концентрация носителей мала по сравнению с концентрацией примеси в большей части области обеднения);
- приближение малости объемного заряда в сравнении с зарядом носителей в инверсионном слое.

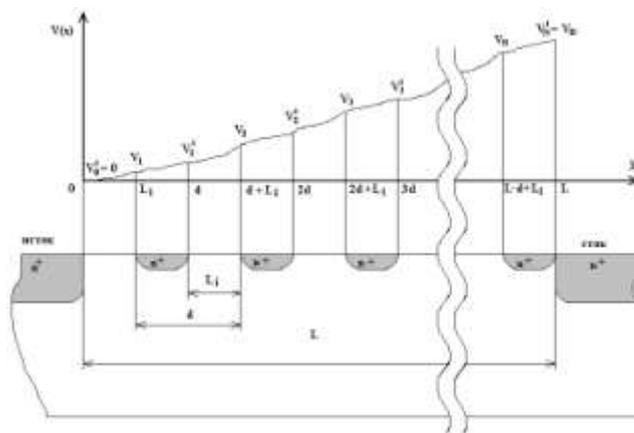
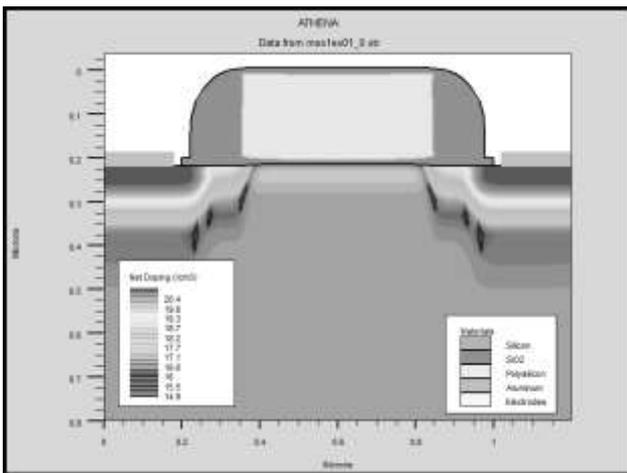


Рис. 1. Секционированный канал МДП, состоящий из N секций (N – субтранзисторов)

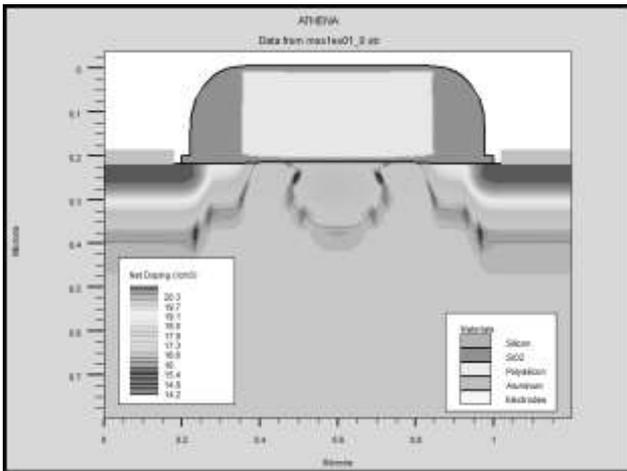
В этом случае система из N уравнений для последовательности  $n$  субтранзисторов сводится к выражению

$$I_D = \frac{\mu \cdot C \cdot W}{(L/a)} \cdot V_D \cdot (V_g^* - \frac{V_D}{2})$$

где  $\mu$  - подвижность,  $C$  - удельная емкость затвора,  $W$  - ширина канала,  $L_i$  - длина канала  $i$ -субтранзистора,  $L$  - длина канала исходного транзистора,  $D$  - период секционированного канала,  $a$  - геометрический фактор. Следовательно  $V_g^* = V_g - V_t$ , где  $V_g$  и  $V_t$  - напряжения на затворе и пороговое напряжение, соответственно (все субтранзисторы одинаковы по физической структуре – используем это приближение). Результаты физического моделирования показывают, что данное приближение допустимо лишь для малых токов. На рис. 2 приведены моделируемые структуры в программе ATHENA фирмы Silvaco. Данная модель соответствует структуре объемного КМОП транзистора с топологическими нормами 0,18 и 0,25 мкм. Распределение потенциала определяется решением уравнения Пуассона.



а)



б)

Рис. 2. Моделируемые структуры: а – референсный МДП транзистор, б – транзистор с разбиением канала

С помощью разработанной модели могут быть смоделированы основные характеристики

транзисторных структур, обеспечивающие синтез SPICE параметров, необходимых при оценке быстродействия основных библиотечных элементов. На рис. 3 приведены результаты синтеза ВАХ при прочих равных условиях для МДП структуры и структуры с разбиением канала. Геометрический фактор  $a$  вполне соответствует упрощенной модели для области малых токов.

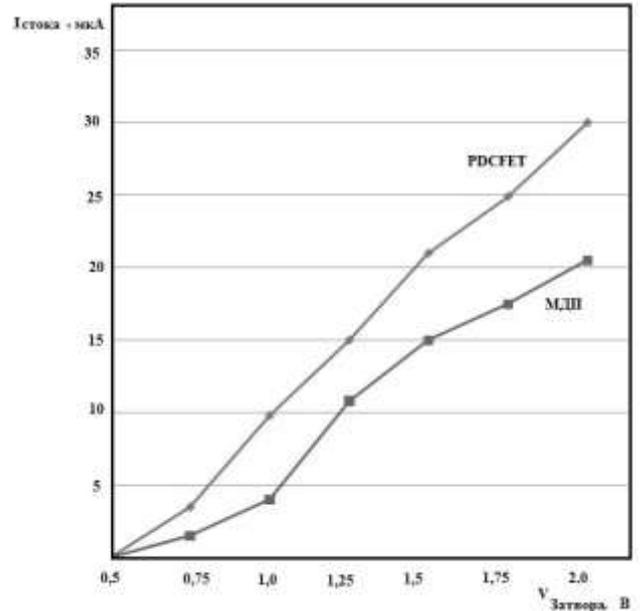


Рис. 3. Моделирование ВАХ тестовых структур

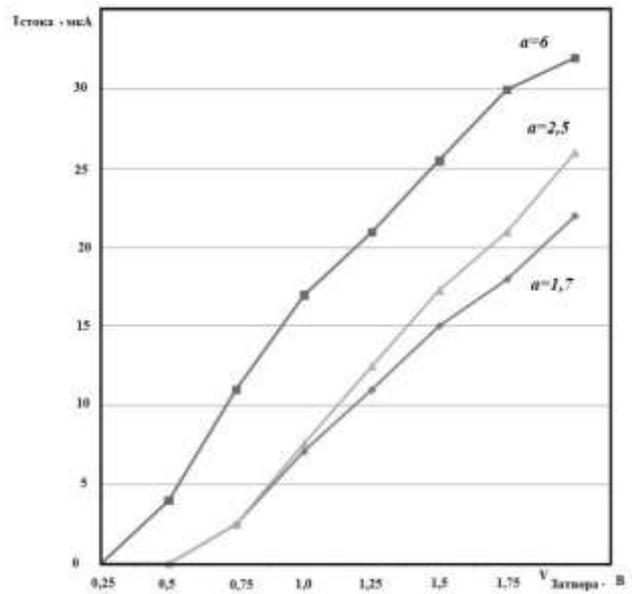


Рис. 4. ВАХ модели PDCFET для различных геометрических факторов  $a$

На рис. 4 приведен характер изменения ВАХ при различных  $a$ . Уменьшение эффективной длины канала за счет увеличения размеров островка легирования в подзатворной области не является эффективным средством улучшения характеристик за счет геометрического фактора. Кроме того, при

увеличении параметра  $\alpha$  для PDCFET расстояние между легированными областями  $Li$  уменьшается (близко к режиму «смыкания» легированных областей со стороны стока в большей степени) и, соответственно, возможен эффект уменьшения порогового напряжения. В данном случае он уменьшается при  $\alpha=6$  с 0.5В до 0.25В (пороговое напряжение определяется при токе стока, близком к 0). Пороговые напряжения МДП и PDCFET с параметром  $\alpha$  близким к 2 примерно соответствуют 0.5В, что говорит, скорее всего, об отсутствии «смыкания» легированных областей в PDCFET и возможно неплохих подпороговых характеристиках моделируемого транзистора. При наличии технологических возможностей большой интерес представляет увеличение количества островков при фиксированном  $\alpha$ .

В качестве параметра для оценки быстродействия транзисторной структуры возьмем время переноса заряда от островка к островку:

$$t = \int_0^{Li} \frac{dl}{\mu E},$$

где  $\mu$  - подвижность, а  $E$  - напряженность электрического поля:

$$E = \frac{\Delta V}{Li} \cong \frac{V_D}{nLi}$$

Используя приближения, приведенные на рис. 1, можно показать, что

$$t \cong L^2 / (n\alpha^2 \mu V_D),$$

где  $V_D$  - напряжение на стоке транзистора,  $n$  - количество субтранзисторов. Выигрыш в быстродействии PDCFET транзистора и референсного МДП транзистора пропорционален отношению:

$$t_{n=1} / (nt) = \alpha^2.$$

Для модели, приведенной на рис. 2, выигрыш в быстродействии PDCFET транзистора по сравнению с референсным МДП транзистором возможен от 1,5 до 2-х раз.

### III. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОМАСОК

Применение PDCFET транзисторов ограничивается возможностями соответствующих технологических процессов. Актуальной задачей является разработка и отработка технологических операций и технологического маршрута, непосредственное изготовление МОП транзистора с периодически легированным каналом (МОП ПЛК) [1,3].

Одним из подходов формирования МОП ПЛК является использование наномаски на основе волнообразного нанорельефа (ВНР), при этом наномаска для периодического легирования является основным элементом. Для создания наномаски использованы самоформирующиеся структуры в виде волнообразной топографии, возникающие в процессе распыления поверхности потоками ионов с энергией 1

– 10 кэВ при углах бомбардировки отличных от нормали. Анизотропный периодический микрорельеф, образующийся на аморфных или аморфизованных ионным воздействием поверхностях, представляет собой волнообразную структуру периодическую в плоскости падения ионного пучка с ориентацией гребней волн перпендикулярной данной плоскости и не зависящей от кристаллографической ориентации образца.

Основными отличительными характеристиками ВНР, образующегося в системе  $N_2^+ - Si$ , являются: малые глубины распыления, отвечающие его формированию; минимальные значения длины волны ВНР; стабильность и планарность сформированной структуры.

На стадии распыления дифференциация состава на склонах волн приводит к росту амплитуды волны, а затем на склонах волн, обращенных к ионному потоку, формируются нанополоски из нитрида кремния как показано на рис. 5 [1].

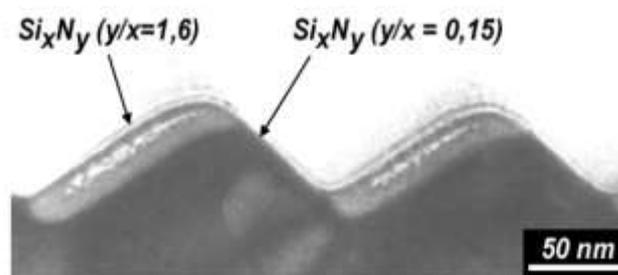


Рис. 5. Способ образования ВНР [1]

В процессе распыления поверхность остается практически ровной вплоть до глубины, обозначенной  $D_m$ . На этой глубине образуется малоамплитудный ВНР с длиной волны, определяемой условиями формирования. Дальнейшее ионное воздействие приводит к интенсивному росту амплитуды ВНР без изменения длины волны. Этот процесс завершается на глубине, обозначенной  $D_F$ . Важной особенностью сформированного ВНР в системе  $N_2^+ - Si$  является его высокая стабильность. При дозах, отвечающих глубинам распыления вплоть до  $3D_F$ , длина волны рельефа остается практически неизменной.

Нанополоски из аморфного нитрида кремния являются важным составным компонентом внутреннего строения каждой волны. Они могут выступать в качестве маскирующих элементов в процессах модификации ВНР с помощью плазмохимического травления. Исходная структура для формирования наномаски представляет собой слой  $a - Si$  на подслое оксида кремния, который выполнял функцию стоп - слоя в процессе плазмохимического травления ВНР.

Плазмохимическое анизотропное травление в отличие от изотропного жидкостного травления - более эффективный способ модификации геометрии волны ВНР. Задачей является выбор режимов анизотропного и селективного травления кремния по

отношению к слоям аморфного нитрида кремния  $\text{Si}_x\text{N}_y$ , которыми представлены склоны волн, обращенные к ионному пучку.

В работе [1] использовалось формирование наномаски из аморфного кремния на основе ВНР с длиной волны  $\lambda = 150$  нм для создания МОП транзистора с периодически легированным каналом.

Кроме того, особенностью технологии создания МОП транзистора с периодически легированным каналом является необходимость формирования мелких и сверхмелких (глубиной до 50 нм) легированных областей в кремнии глубиной до 50 нм. Важнейшей задачей в технологии создания периодически легированного канала транзистора с периодом 150 нм и менее является формирование мелких распределений легирующей примеси. Из-за потенциальной опасности смыкания легированных нанодоменов был выбран мышьяк в качестве легирующей примеси (канала N МОП транзистора), также потребовалось проведение моделирования технологических процессов с использованием быстрого термического отжига (RTA), применение которых является необходимым условием создания мелких профилей легирования в технологиях субмикронного уровня.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод периодически легированного канала первоначально рассматривался как приложение для транзисторных структур на органических

полупроводниках. Однако возможности модуляции проводимости канала в КМОП транзисторах также представляют значительный интерес. Реализованная приборно-технологическая модель PDCFET на основе программ TCAD позволяет решать вопросы технологической реализации и характеристики для транзисторов, изготавливаемых по нормам 0,18 и 0,25 мкм формированием подзатворных областей на основе наномасок.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Smirnov V.K., Kibalov D.S., Orlov O.M. and Grabosnikov V.V. Technology for nanoperiodic doping of a metal-oxide-semiconductor field – effect transistor channel using a self-forming wave-ordered structure // Nanotechnology. 2003. № 14. P. 709-715.
- [2] Lee C.S., Yang W.L. and Chen H.H. Analytic Modeling for Current-Voltage Characteristics and Drain-Induced Barrier-Lowering (DIBL) Phenomenon of the InGaP/InGaAs/GaAs PDCFET // Journal of the Korean Physical Society. December 2004. Vol. 45. P. S513-S518.
- [3] Nir Tessler, Moti Margalit, Oded Globerman, Roy Shehhar. Transistor structures and methods of fabrication thereof // US patent 8309953 B2 ; опубл. 13.11.2012.
- [4] Gergel V.A., Gulyaev Yu.V., Zeleny A.P., Yakupov M.N. A super-speed electron drive in field semiconductor structures supplied with a sectioned channel // The Institute for Radio-Engineering and Electronics. Russian Academy of Sciences. Fizika I tehnika poluprovodnikov. 2004. Vol. 38. № 2. P. 237-241.