

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ДВУХ ЗАТВОРНЫХ ПОЛЕВЫХ НАНОТРАНЗИСТОРАХ С ГАУССОВЫМ
ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ**

© 2016 г. Н.В. МАСАЛЬСКИЙ

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, г. Москва

Введение

На современном этапе развития технологии реальные КМОП транзисторы характеризуются неравномерным распределением легирующей примеси в рабочей области из-за требования ряда операций имплантации и диффузии во время процесса изготовления [1]. Таким образом, моделирование основных характеристик транзистора, например, распределение потенциала в рабочей области, вольт-амперные характеристики и т.д., необходимо проводить с учетом данного положения, что может обеспечить более адекватные электро-физические характеристики [2]. При схемотехническом моделировании неравномерность профиля легирования, как правило, описывается гауссовой функцией вида: $N_A(x) = N_{pick} \exp(-(\frac{x - R_d}{\sqrt{2}\sigma_d})^2)$, где N_{pick} - максимальная

концентрация легирующей примеси, $2R_d$ – протяженность профиля и σ_d - крутизна профиля, соответственно, пик профиля легирования, как предполагается, расположен в середине по глубине рабочей области. Следует отметить, что применение заданного гауссова профиля легирования может помочь в решении проблемы подавления коротко-канальных эффектов [2].

Применительно к двух затворным симметричным КНИ КМОП нанотранзисторам в настоящей работе анализируются характеристики базовых логических вентилях. Моделирование характеристик вентилях осуществлялось в два этапа. Первоначально численно решалось уравнение Пуассона с расширенными граничными условиями. Вычислялось распределение потенциала рабочей области транзистора, а также поверхностный потенциал, электрическое поле, пороговое напряжение, подпороговый наклон, которые сопоставлялись с данными моделирования программы ATLAS. Далее при помощи потенциальной модели [3] определялись ВАХ транзисторов во всей области функционирования. ВАХ рассчитывались с учетом полевой и концентрационной зависимости подвижности. На втором этапе при помощи математического ядра программы HSPICE рассчитываются статические и динамические характеристики инвертора.

1. Анализ передаточной характеристики инвертора на неравномерно легированных КНИ КМОП нанотранзисторах

Проанализируем ситуацию, когда оба затвора неравномерно легированных полностью обедненных КНИ нанотранзисторов, входящих в состав инвертора, подано напряжение U_{in} отлично от нуля. Как было показано в [2], наличие гауссова профиля легирования определяет неравномерное распределение носителей по всей глубине рабочей области, что приводит к изменению порогового напряжения U_{th} транзисторов. Для комплементарных транзисторов n- и p- типов рост параметра σ_d снижает величину U_{th} . И наоборот, снижение параметра σ_d приводит к увеличению U_{th} . В общем случае это приводит к изменению режима работы инвертора. Допустим, что крутизна про-

филя легирования возросла (численное значение σ_d уменьшилось). Тогда при изменении U_{in} от низкого уровня до высокого, транзистор n-типа переходит в проводящее состояние при более высоком значении напряжения на затворах. Следовательно, инвертор переходит в режим переключения. Это приводит к смещению его передаточной характеристики в область низких высоких напряжений относительно аналогичной зависимости при начальном значении параметра σ_d . Величина смещения передаточной характеристики будет зависеть от величины приращения $\Delta\sigma_d$. При уменьшении крутизны профиля легирования (увеличении значения σ_d) будет наблюдаться обратный сдвиг передаточной характеристики. В общем случае пороговое напряжение аппроксимируется следующим выражением $U_{th}^{(n,p)}(\sigma_d) = U_{th}^{(n,p)}(0) + \gamma_\sigma \sigma_d$, где $U_{th}^{(n,p)}(0)$ - пороговое напряжение при $\sigma_d \rightarrow \infty$, γ_σ - эффективный коэффициент, зависящий от многих технологических параметров. На рис. 1, а приведена расчетная зависимость $U_{th}(\sigma_d)$ для базового двух затворного симметричного равномерно легированного КНИ нанотранзистора. Его параметры: $L_g = 45$ нм, $t_s = 8$ нм, $t_{ox} = 1.5$ нм, $N_{pick} = 1 \times 10^{15}$ см⁻³, где L_g – длина затвора транзистора, t_s - толщина рабочей области транзистора, t_{ox} - толщина подзатворного диэлектрика.

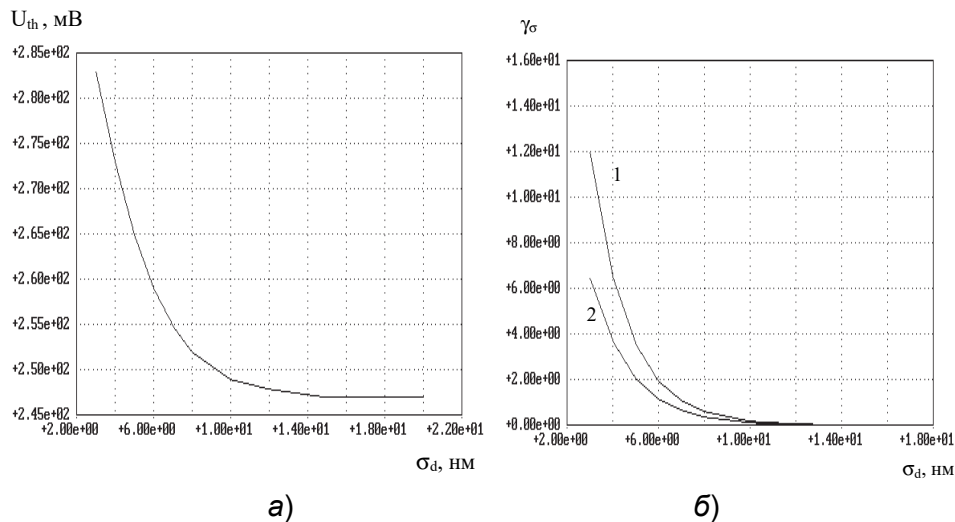


Рис. 1. а) (левый) Зависимость U_{th} от σ_d ; б) (правый). Зависимость коэффициента γ_σ от σ_d при разных значениях пиковой концентрации легирования, где 1 – $N_{pick} = 1 \times 10^{18}$ см⁻³, 2 – $N_{pick} = 1 \times 10^{15}$ см⁻³.

Опираясь на данную зависимость легко вычислить коэффициент γ_σ . Для данного случая вид полученной функции приведен на рис. 1, б (кривая 1).

Количественное значение коэффициента γ_σ определяется многими топологическими параметрами. Которые собственным образом изменяют крутизну функции $\gamma_\sigma(\sigma_d)$. Одним из действенных параметров, влияющих на значение γ_σ , является пиковая концентрация легирования. Ее изменение на 3 порядка приводит к уменьшению практически в два раза γ_σ в области низких значений σ_d (см. рис. 1, б). В общем случае пороговое напряжение при больших значениях σ_d соответствует случаю равномерно легированной рабочей области, при $\sigma_d \rightarrow 0$ нелегированной рабочей области.

В общем случае рассмотренное поведение U_{th} обуславливает формирование семейства передаточных характеристик, как схематично представлено на рис. 2. Как и

в классическом случае существуют два устойчивых состояния: **A**, где $U_{in} = 0$ (низкий уровень) и $U_{out} = 1$ (высокий уровень), и **B**, где $U_{in} = 1$ и $U_{out} = 0$. Для любых произвольных значений U_{in} в интервале от 0 до 1 соответствующее значение U_{out} определяется соотношением токов I_n и I_p .

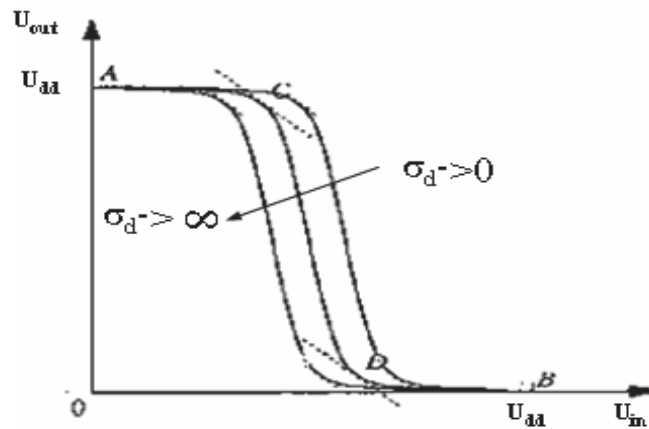


Рис. 2.

2. Временные задержки при переключениях инвертора неравномерно легированных КНИ КМОП нанотранзисторах

На рис. 3 приведены результаты моделирования переходных характеристик инвертора на выбранном прототипе транзистора с разным профилем легирования: от практически равномерного $\sigma_d = 15$ нм до ярко выраженного гауссова профиля с $\sigma_d = 2$ нм. Следует отметить, что отношения ширин комплементарных транзисторов выбрано таким образом, чтобы их токи насыщения совпадали. Из представленных данных следует, что чем больше крутизна профиля легирования, тем меньше задержка, т.е. если $\sigma_{d1} > \sigma_{d2}$, то $d_1 > d_2$, где $d_{1(2)}$ – задержка инвертора по входу. Для данного инвертора на рис. 4 представлена зависимость задержки от крутизны профиля легирования. Характер данной зависимости близок к линейному. Во все исследуемом диапазоне задержка уменьшается на 3.5 пс или примерно на 20%.

Количественной характеристикой для задержки инвертора на неравномерно легированных КНИ КМОП нанотранзисторах с учетом линеаризованного характера зависимости задержки от крутизны профиля легирования, может быть выражение:

$$d = d_0 - \alpha_\sigma \sigma_d \quad (1)$$

где
$$d_0 = \frac{CU_{dd}}{A_{sat}} \left(1 + \frac{U_{sat}}{U_{g\text{eff}}} \gamma_\sigma\right), \quad \alpha_\sigma = \frac{2CU_{dd}}{A_{sat}U_{g\text{eff}}} \gamma_\sigma, \quad A_{sat} = \frac{W\mu_0 C_{ox} U_{sat} U_{g\text{eff}}}{2L_{g\text{eff}} \left(1 + \frac{U_{sat}}{E_c L_{g\text{eff}}}\right)},$$

$U_{g\text{eff}} = 2(U_g - U_{th}^0) - U_{sat}$, $L_{g\text{eff}} = L_g - \Delta L$, C – полная эквивалентная емкость, заряжаемая и разряжаемая в тактовом цикле, U_{dd} – напряжение питания, W – ширина рабочей области транзистора, ΔL – величина области насыщения дрейфовой скорости, где плотность инвертированного заряда не зависит от координаты вдоль рабочей области, напряженность электрического поля достигает критического значения $E_c = \frac{2v_{sat}}{\mu_0}$ – поля

насыщения, v_{sat} – дрейфовая скорость насыщения, μ_0 – подвижность носителей, C_{ox} – емкость затвора, U_g – напряжение на затворах транзисторов (входное напряжение), U_{sat} – напряжение насыщения транзисторов.

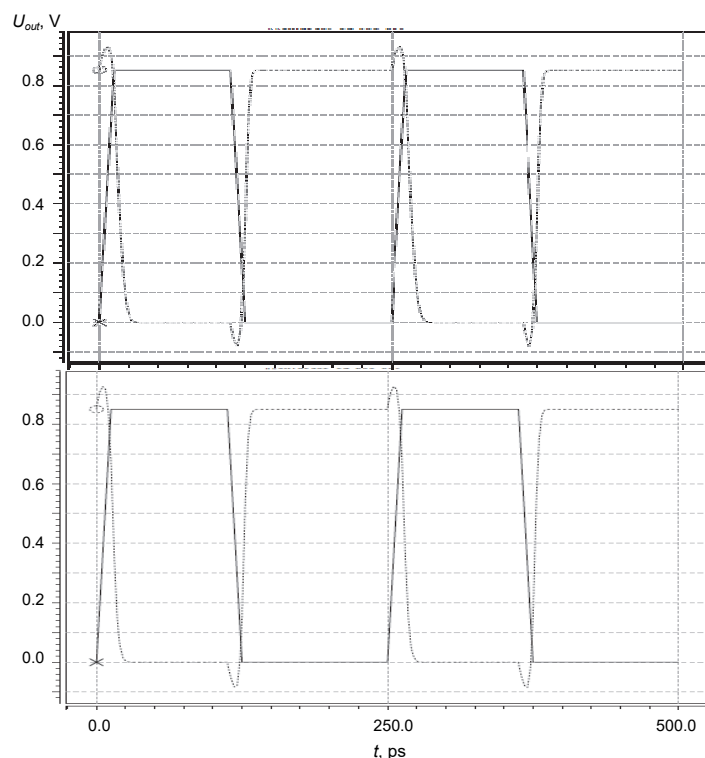


Рис. 3. Переходные характеристики инвертора на КНИ КМОП нанотранзисторах с вертикальным профилем легирования рабочей области для разной крутизны профиля легирования, где верхний рисунок при $\sigma_d = 15$ нм, нижний рисунок при $\sigma_d = 2$ нм.

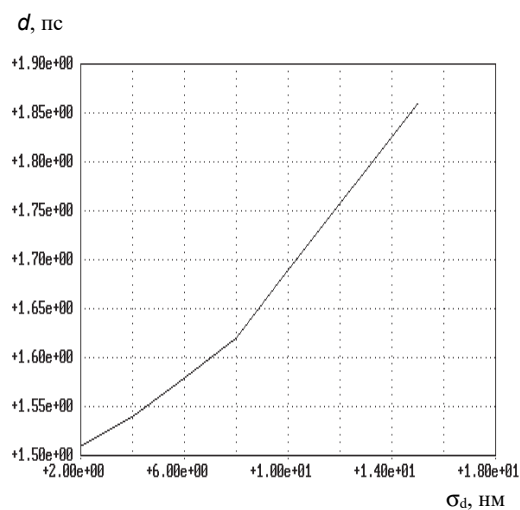


Рис. 4. Зависимость задержки инвертора от крутизны профиля легирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suzuki K., Yuji K., Susumu N., Charles W. M., Temel H. B., Tsutomu N. Analytical model for redistribution profile of ion-implanted impurities during solid-phase epitaxy // IEEE Trans. Electron Devices. – 2007, v. 54, № 2, p. 262-271.
2. Масальский Н.В. Пороговые характеристики двух затворных полевых нанотранзисторов с гауссовым вертикальным профилем легирования // Наноструктуры и наноматериалы-XXI век. -2016, № 1, с. 46-51.
3. Масальский Н.В. Температурная модель тока симметричного двухзатворных КНИ КМОП нанотранзистора // «INTERMATIC- 2015» / Материалы Международной НПК, 1-5 декабря 2015 г. Москва. - М.: МИРЭА, 2015, ч. 4, с. 14-17.