

энергии СВЧ поля, нерезонансное поглощение также является значительным.

Литература

1. Polak, M., Kottman P., Majoros M. [et al.] Magnetic field distribution above a superconducting YBaCuO sample as an indication of sample inhomogeneities / M. Polak, P. Kottman, M. Majoros M. // Superconductor Science Technology. – 1990. – V. 3. – P. 67.

2. Hagen, C.W., Griessen, R.P., Salomons, E. Thermally activated flux motion in high Tc superconductors: an analytical model / C.W. Hagen, R.P. Griessen, E. Salomons // Physica C. – 1989. – V. 157. – P. 199.

3. Буев, А.Р. Исследование высокотемпературной высокопроводимости с помощью нового бесконтактного метода / А.Р. Буев // Известия вузов. Поволжский регион. – 2004. – № 5. – С. 98-104.

УДК 621.382

## О КВАНТОВАНИИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В КАНАЛЕ КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Жевняк О.Г., Жевняк Я.О.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Как хорошо известно, в инверсионных слоях кремния возникает квантование энергии электронов в связи с тем, что средняя толщина этих слоев (около 10 нм) сравнима с длиной волны де Бройля электронов [1]. Форма квантовой ямы инверсионного слоя имеет треугольный вид, в результате чего расчет квантовых состояний электронов возможен только с помощью численного решения уравнения Шрёдингера для треугольной ямы [1, 2]. Проводящий канал короткоканальных МОП-транзисторов, являющихся основным элементом современных микропроцессоров, по сути представляет собой обедненную область на поверхности кремния, включающую в себя и инверсионный слой (если он сформируется). В этой связи квантование энергии электронов в инверсионном слое кремния может оказывать определенное влияние на характеристики МОП-транзисторов. Однако короткоканальный эффект, обусловленный сравнимостью размеров областей истока и стока транзистора с его длиной канала, может значительно исказить это влияние [3, 4]. В связи с тем, что затворное и стоковое напряжения в МОП-транзисторе включены навстречу друг другу, и глубина стоковой области достаточно велика, квантование энергии электронов в определенных участках канала будет исчезать, так как в них будет наблюдаться существенное расширение проводящего канала – до размеров заметно больших длины волны де Бройля электронов [4].

Целью настоящего доклада явилось изучение условий, при которых квантование энергии электронов в канале короткоканального МОП-транзистора будет существенным. В основе данного изучения лежит двухэтапная схема. Вначале проводилось численное моделирование электронного переноса в канале МОП-транзистора с помощью метода Монте-Карло (см., например, [3-5]). В результате моделирования путем численного решения уравнения Пуассона и

кинетического уравнения Больцмана рассчитывались потенциальные профили  $U(z)$  проводящего канала в глубь подложки МОП-транзистора. Далее для выбранных профилей осуществлялось численное решение уравнения Шрёдингера в виде:

$$\psi'' + 2m/\hbar^2 (E - U(z))\psi = 0.$$

Профиль  $U(z)$  аппроксимировался линейной функцией, что позволяло решить уравнение Шрёдингера с помощью степенных рядов (см., например, [6]) и рассчитать энергетические уровни. Если расстояние между ближайшими уровнями заметно превышало величину  $k_B T$ , то в яме возникало размерное квантование, в противном случае – оно отсутствовало.

На рис. 1 приведена схема моделируемого МОП-транзистора. Рассматривались два типа приборов – с глубоким (стандартным) стоком (глубина залегания  $x_j = 0,1$  мкм) и мелким стоком ( $x_j = 0,01$  мкм). Напряжение на стоке  $V_D = 1$  В, а напряжение на затворе  $V_G = 1$  В и  $V_G = 3$  В. Остальные параметры транзистора были следующими:  $L_{ch} = 0,4$  мкм,  $d_{ox} = 6$  нм,  $N_D = 5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_A = 5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ .

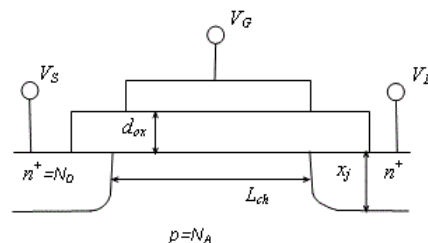


Рисунок 1 – Схема конструкции моделируемого МОП-транзистора

На рисунках 2 – 3 приведены полученные в результате моделирования профили для двух сечений канала в глубь подложки: в начальной части канала (на расстоянии около  $0,2 L_{ch}$  от истока) – штриховые кривые и вблизи стока (около  $0,1 L_{ch}$  от стока) – непрерывные кривые.

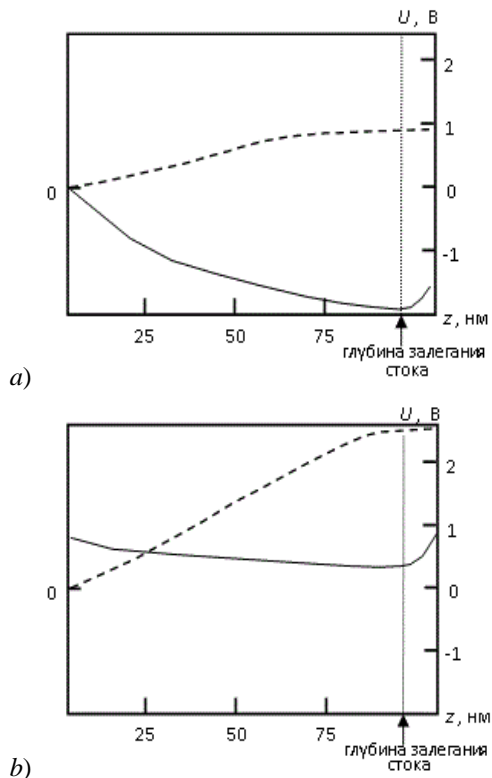


Рисунок 2 – Рассчитанные потенциальные профили для проводящего канала транзистора с глубоким стоком: *a* –  $V_G = 1$  В; *b* –  $V_G = 3$  В

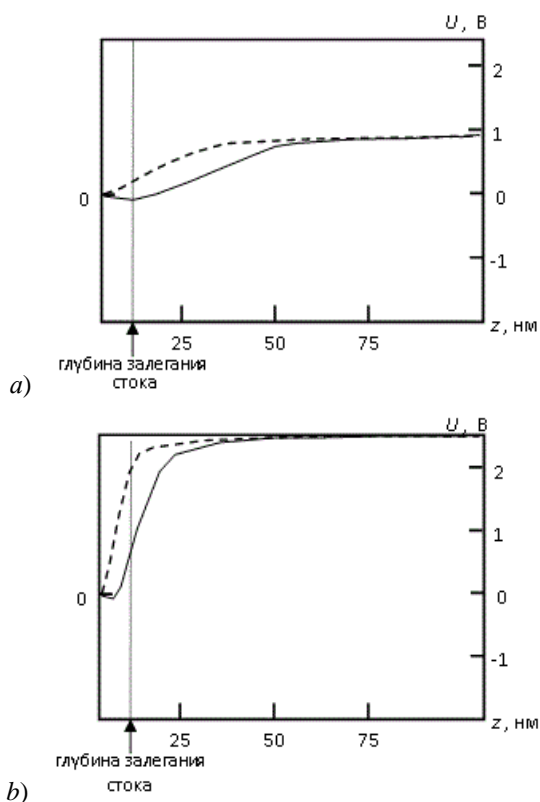


Рисунок 3 – Рассчитанные потенциальные профили для проводящего канала транзистора с мелким стоком: *a* –  $V_G = 1$  В; *b* –  $V_G = 3$  В

Полученные профили для МОП-транзисторов с глубоким стоком показывают, что только в начале канала формируется яма, близкая по форме к треугольной. Однако ее глубина и ширина таковы, что в ней не возникает размерное квантование. Вблизи стока для рассматриваемых условий инверсионный слой вообще отсутствует (так называемая отсечка канала).

Для транзистора с мелким стоком размерное квантование при  $V_G = 1$  В также не возникает. И только при  $V_G = 3$  В оно возникает и при этом в существенно выраженном виде на большей части канала, но вблизи стока также исчезает. Очевидно, что появление размерного квантования в данном случае обусловлено подавлением короткоканального эффекта в приборах с мелким стоком при больших напряжениях на затворе.

Таким образом, в настоящей работе на основе численного моделирования методом Монте-Карло электронного переноса и численного решения уравнения Шредингера показано, что квантование энергии электронов в проводящих каналах короткоканальных МОП-транзисторов может быть существенным только для приборов с мелкими стоками и при напряжениях на затворе, превышающих напряжение на стоке. В большинстве остальных случаев квантование вообще не возникает, либо его влияние несущественно.

#### Литература

1. Андо Т., Фаулер А, Стерн Ф. Электронные свойства двумерных систем. – Москва: Мир, 1985. – 416 с.
2. Fischetti M. V., Laux S. E. Monte Carlo study of electron transport in silicon inversion layers // Phys. Rev. B. – 1993. – Vol. 48, Iss. 4. – P.2244–2274.
3. Борздов В.М., Жевняк О.Г., Комаров Ф.Ф., Галенчик В.О. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники – Минск: БГУ, 2007. – 175 с.
4. Zhevnyak O., Borzdov V., Borzdov A., Pozdnyakov D., Komarov F. Monte Carlo study of influence of channel length and depth on electron transport in SOI MOSFETs // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 7025. – P. 1L-1–8.
5. Zhevnyak O. Temperature effect on electron transport in conventional short channel MOSFETs: Monte Carlo simulation // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 7025. – P. 1M-1–8.
6. Жевняк О. Г. Коэффициенты туннелирования электронов через потенциальные барьеры треугольной и ступенчатой формы // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – Вып. 9, Ч. 3. – С. 46–48.