

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАХ СУБМИКРОННОГО КНИ-МОП-ТРАНЗИСТОРА С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ

А. В. Борздов, В. М. Борздов, Н. Н. Дорожкин

¹*Белорусский государственный университет, borzdov@bsu.by*

С помощью многочастичного метода Монте-Карло проведено моделирование процессов переноса носителей заряда в субмикронном КНИ-МОП-транзисторе с длиной канала 100 нм. Рассчитаны значения эффективной пороговой энергии ударной ионизации электронами с использованием описания данного процесса в рамках модели Келдыша и в рамках модели, основанной на численном расчете реальной зонной структуры кремния.

В последние годы большое внимание уделяется численному моделированию электрических характеристик кремниевых субмикронных интегральных полевых транзисторов со структурой кремний-на-изоляторе (КНИ-МОП-транзисторы). Данный тип транзисторов имеет ряд преимуществ по сравнению с обычными МОП-транзисторами и является весьма перспективным с точки зрения создания новой элементной базы интегральной электроники [1, 2]. В связи с уменьшением длины канала транзисторов до глубокосубмикронных размеров (0,1 мкм и менее) особый интерес представляет исследование эффектов, связанных с разогревом носителей заряда в сильных электрических полях, наблюдающихся в рабочих областях приборов. В частности, большое значение имеет процесс ударной ионизации который может оказывать большое влияние на электрические характеристики транзистора [3].

Процесс ударной ионизации является пороговым процессом и характеризуется пороговой энергией E_{th} [4]. Ранее в [5] был предложен метод оценки пороговых энергий ионизации для ряда полупроводников с учетом их реальной зонной структуры и высказано предположение о возможности существования нескольких значений пороговых энергий, а также сделан вывод о том, что средняя (или эффективная) пороговая энергия носителей заряда в постоянном поле может зависеть от его напряженности. Целью настоящей работы явился расчет эффективной пороговой энергии ударной ионизации электронами в канале субмикронного КНИ-МОП-транзистора с длиной канала 0,1 мкм с использованием двух наиболее часто встречающихся при моделировании процессов переноса в кремнии моделей ударной ионизации. Первая – модель Келдыша с мягким порогом, параметры которой описаны в [6]. Вторая – модель, основанная на численном расчете реальной зонной структуры кремния [7]. Преимуществом модели Келдыша является относительная простота и, соответственно, меньшие затраты вычислительных ресурсов на расчет интенсивности данного процесса и определения конечных состояний частиц после акта ударной ионизации. Недостатком модели является то, что она не учитывает особенностей реальной зонной структуры кремния и, как результат, содержит подгоночные параметры. Преимущество моделей, основанных на расчете полной зонной структуры кремния, заключается в отсутствии подгоночных параметров, однако их использование ограничивается вычислительными затратами, необходимыми для расчета интенсивности процесса ударной ионизации и определения состояний конечных частиц после акта ударной ионизации. При этом следует отметить, что ранее эффективная пороговая

энергия в канале глубокосубмикронных МОП-транзисторов в рамках модели Келдыша с мягким и жестким порогами исследовалась нами в [8, 9].

Одним из наиболее эффективных методов моделирования кремниевых субмикронных МОП-транзисторов, позволяющих учесть все доминирующие механизмы рассеяния носителей заряда, а также процесс ударной ионизации, является многочастичный метод Монте-Карло. Моделируемый прибор представляет собой КНИ-МОП-транзистор с полным обеднением [10]. Основные размеры транзистора следующие: длина канала – 100 нм, толщины канала, скрытого окисла и подложки составляют 30 нм, 100 нм и 200 нм соответственно. Толщина подзатворного окисла – 5 нм. Температура моделирования 300 К. Напряжение на электродах истока и подложки равно нулю, а напряжения стока и затвора прикладываются относительно истока.

Уровни легирования n^+ областей истока и стока составляют 10^{25} м^{-3} , уровень легирования канала $p\text{-Si} - 8 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

На рисунке приведены рассчитанные зависимости эффективной пороговой энергии ударной ионизации электронами в канале транзистора E_{th} от напряжения на стоке V_D для четырех значений напряжения на затворе V_G : $V_G = 0,75 \text{ В}$; 1 В ; $1,25 \text{ В}$ и $1,5 \text{ В}$. Сплошные кривые соответствуют расчету интенсивности процесса ударной ионизации в рамках модели Келдыша [6], а штриховые — с учетом реальной зонной структуры кремния [7]. При этом на рисунке большему значению затворного напряжения соответствует кривая с меньшим значением эффективной пороговой энергии.

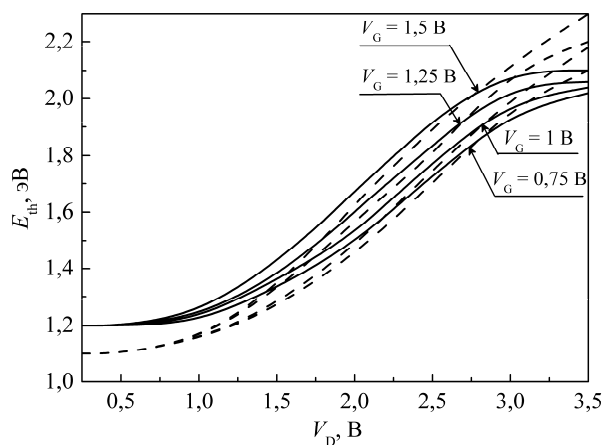


Рисунок – Зависимости эффективной пороговой энергии ударной ионизации от напряжения на стоке транзистора

Важным моментом при моделировании процесса ударной ионизации является определение конечных состояний частиц после акта ударной ионизации. При использовании модели Келдыша прибегают к ряду упрощений. В частности, предполагают, что импульсы конечных частиц коллинеарны. Численный расчет дает возможность строить функции распределения конечных частиц по энергиям и импульсам [7], однако это является весьма затратным с вычислительной точки зрения. На наш взгляд, наиболее точным и оптимальным для алгоритма Монте-Карло на сегодняшний день является метод определения конечных состояний электронов и дырок, предложен-

ный в [11], который и был использован при расчете зависимостей, приведенных на рисунке для модели ударной ионизации, учитывающей реальную зонную структуру кремния. Результаты расчетов эффективной пороговой энергии ударной ионизации как для модели Келдыша с мягким порогом, так и для модели, основанной на численном расчете зонной структуры, свидетельствуют, что в целом характер данных зависимостей сохраняется как в субмикронных МОП-транзисторах [9], так и в КНИ-МОП-транзисторах [10]. А именно – в определенном диапазоне стоксовых напряжений сохраняется близкая к линейной зависимость E_{th} от V_D для различных V_G . Вместе с тем, как было показано в [12], использование модели Келдыша приводит к гораздо более быстрому росту плотности тока в канале транзистора с ростом напряжения на стоке и более раннему лавинному пробую, что связано с более высоким значением интенсивности процесса ударной ионизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Silicon-on-insulator (SOI) Technology. Manufacture and Applications / eds. O. Kononchuk and B.-Y. Nguyen. – Cambridge, Sawston: Woodhead Publishing, 2014. – 474 p.
2. Sakurai, T. Fully-Depleted SOI CMOS Circuits and Technology for Ultralow-Power Applications / T. Sakurai, A. Matsuzawa, T. Douseki. – Dordrecht: Springer, 2006. – 411 p.
3. Fischetti, M. V. Understanding hot-electron transport in silicon devices: is there a shortcut? / M. V. Fischetti, S. E. Laux, E. Crabbe // Journal of Applied Physics. – 1995. – Vol. 78, No. 2. – P. 1058–1087.
4. Bude, J. Thresholds of impact ionization in semiconductors / L. Bude, K. Hess // Journal of Applied Physics. – 1992. – Vol. 72, No. 8. – P. 3554–3561.
5. Anderson, C.L. Threshold energies for electron-hole pair production by impact ionization in semiconductors / C.L. Anderson, C.R. Crowell // Physical Review B. – 1972. – Vol. 5, No. 6. – P. 2267–2272.
6. Ridley, B.K. Soft-threshold lucky drift theory of impact ionization in semiconductors / B.K. Ridley // Semiconductor Science and Technology. – 1987. – No. 22. – P. 116–122.
7. Kane, E.O. Electron scattering by pair production in silicon / E.O. Kane // Physical Review. – 1967. – Vol. 159, No. 3. – P. 624–631.
8. Speransky, D. Impact ionization process in deep submicron MOSFET / D. Speransky, A. Borzdov, V. Borzdov // International Journal of Microelectronics and Computer Science. – 2012. – Vol. 3. No 1. – P.21–24.
9. Борздов, В.М. Оценка эффективной пороговой энергии межзонной ударной ионизации в глубокосубмикронном кремниевом n-канальном МОП-транзисторе / В. М. Борздов [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43. № 3. – С. 188–192.
10. Borzdov, A.V. Monte Carlo simulation of hot electron transport in deep submicron SOI MOSFET / A.V. Borzdov, V.M. Borzdov, V.V. V'yurkov // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9440. – P. 944013-1–944013-7.
11. Kamakura, Y. Impact ionization model for full band Monte Carlo simulation / Y. Kamakura [et al.] // Journal of Applied Physics. – 1994. – Vol. 75, No. 7. – P. 3500–3507.
12. Борздов, А.В. Моделирование влияния процесса ударной ионизации на электрические характеристики субмикронного КНИ-МОП-транзистора / А.В. Борздов, В.М. Борздов, Н.Н. Дорожкин // Приборостроение-2015: материалы 8-й международной научно-технической конференции, Минск, 25–27 ноября 2015 г.: в 2-х т. – Минск: БНТУ, 2015. – Т. 2. – С. 21–22.