

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМИКРОННОГО КРЕМНИЕВОГО ДИОДА СО СТРУКТУРОЙ n^+-n-n^+ МНОГОЧАСТИЧНЫМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

А. В. Борздов¹, В. М. Борздов¹, П. В. Кучинский²

¹Белорусский государственный университет, borzdov@bsu.by

²НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

Многочастичным методом Монте-Карло проведено моделирование флуктуаций плотности тока в субмикронном кремниевом диоде со структурой n^+-n-n^+ . Рассчитаны автокорреляционные функции флуктуаций плотности тока в диоде во времени для различных значений постоянного напряжения, приложенного к его электродам, с учетом и без учета процесса ударной ионизации.

В связи с уменьшением размеров активных элементов интегральных микросхем большой интерес вызывает изучение влияния шумов на их работу, а также определение основных физических источников этих шумов. Так, в частности, для микро- и наноразмерных интегральных диодов и транзисторов, интерес представляет исследование флуктуаций плотности протекающего тока, оказывающих принципиальное влияние на нормальную работу этих приборов [1, 2]. При этом особое внимание уделяется изучению влияния процессов генерации-рекомбинации носителей заряда на шумовые характеристики приборов. К таким процессам можно отнести лавинное умножение носителей заряда в результате ударной ионизации [3]. Известно, что в настоящее время все большее значение при исследовании шумовых характеристик приобретает численное моделирование, в частности, самосогласованное моделирование переноса носителей заряда на основе многочастичного метода Монте-Карло, поскольку оно позволяет детально исследовать физику этих процессов.

Обзор основных проблем, возникающих при моделировании шумов методом Монте-Карло, можно найти, например, в [4].

Целью данной работы явилось исследование шумовых характеристик кремниевого диода со структурой n^+-n-n^+ в режиме токовых флуктуаций в случае, когда к электродам приложено постоянное напряжение.

В качестве объекта моделирования нами была выбрана диодная структура, аналогичная [5] со следующими параметрами: размеры n^+ -областей, а также n -канала составляют по 100 нм, уровни легирования n^+ -областей и n -канала равны 10^{25} м^{-3} и 10^{22} м^{-3} , соответственно. Температура моделирования принималась равной 300 К.

Для расчета электрических характеристик диода использовалось самосогласованное моделирование процессов переноса электронов и дырок в структуре, включающее решение одномерного уравнения Пуассона. Контакты металл-полупроводник рассматривались как идеальные омические.

Перенос электронов и дырок моделировался с учетом эффекта непараболичности и анизотропии законов дисперсии по аналогии с тем, как это было сделано для кремниевого субмикронного МОП-транзистора в [6]. Учитывалось внутримолекулярное и междолинное рассеяние электронов на фононах, рассеяние на ионизированной примеси и межзонная ударная ионизация. Для дырок учитывались процессы рассеяния на акустических и оптических фононах, а также на ионизированной примеси.

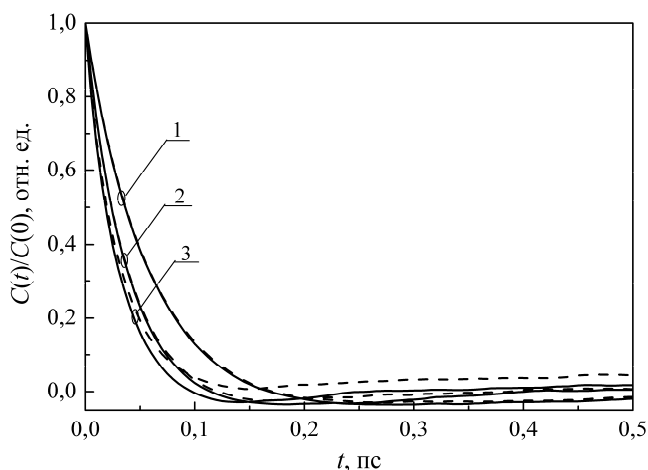


Рисунок – Нормированные автокорреляционные функции флуктуаций плотности тока

В режиме токовых флуктуаций, при котором на электродах диода поддерживается постоянное напряжение, ток смещения можно положить равным нулю, а ток проводимости $I(t)$ в этом случае задается следующим выражением, полученным на основании теоремы Рамо-Шокли [1, 3]:

$$I(t) = \frac{e}{L} \sum_{i=1}^{N_e(t)} v_i(t) - \frac{e}{L} \sum_{j=1}^{N_h(t)} v_j(t), \quad (1)$$

где L – длина области моделирования (расстояние между электродами), v_i и v_j – мгновенные скорости i -го электрона и j -й дырки в момент времени t . Суммирование в (1) ведется по полному числу электронов $N_e(t)$ и дырок $N_h(t)$, находящихся в области моделирования в момент времени t . Отметим, что при моделировании методом Монте-Карло использовался так называемый метод частиц [7], когда реальный ансамбль электронов и дырок заменяется меньшим ансамблем частиц с некоторым эффективным зарядом, значительно большим элементарного. В рамках метода частиц рассчитывается объемная плотность заряда, входящая в уравнение Пуассона.

На рисунке представлены рассчитанные нормированные автокорреляционные функции флуктуаций плотности тока в диоде в зависимости от времени $C(t)/C(0)$ для напряжений на электродах, равных 1 В (кривые 1), 2 В (кривые 2) и 3 В (кривые 3).

Автокорреляционные функции, характеризующие шум суммарного тока электронов и дырок в структуре, рассчитывались с использованием выражения:

$$C(t) = \langle \delta I(0) \delta I(t) \rangle, \quad (2)$$

где $\delta I(t) = I(t) - \langle I \rangle$ – флуктуации суммарного тока [1–3]. Усреднение в (2) проводится по времени. Сплошные кривые на рисунке соответствуют расчетам без учета процесса ударной ионизации, штриховые кривые – с учетом этого процесса. При моделировании шумовых характеристик диода принимался во внимание только процесс ударной ионизации электронами. Интенсивность этого процесса рассчитывалась в рамках модели Келдыша с мягким порогом. Необходимые для этого параметры были взяты из [8].

Результаты проведенных расчетов показали, что процесс ударной ионизации оказывает заметное влияние не только на вольтамперные характеристики рассматривае-

мого субмикронного кремниевого диода при напряжениях между электродами, больших 1 В [9], но и на шумовые, приводя, как это следует из рисунка, к увеличению времени корреляции флуктуаций плотности тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Martin, M.J.* Analysis of current fluctuations in silicon pn^+ and $p+n$ homojunctions / M.J. Martin, J.E. Velazques, D. Pardo // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 79. No. 9. P. 6975.
2. *Rengel, R.* A microscopic interpretation of the RF noise performance of fabricated FDSOI MOSFETs / R. Rengel [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. 2006. Vol. 53. No 3. P. 523.
3. *Reklaitis, A.* Monte Carlo investigation of current voltage and avalanche noise in GaN double-drift impact diodes / A. Reklaitis, L. Reggiani // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. P. 043709-1.
4. *Gonzalez, T.* Monte Carlo simulation of noise in electronic devices: limitations and perspectives / T. Gonzalez [et al.] // Unresolved Problems of Noise and Fluctuations: UPoN 2002: Third International Conference. 2003. Vol. CP665. P. 496.
5. *Muscato, O.* Electrothermal Monte Carlo validation of a hydrodynamic model for sub-micron silicon devices / O. Muscato, V. Di Stefano // Journal of Physics: Conference Series. 2009. Vol. 193. P. 1.
6. *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.
7. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
8. 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.
9. Борздов, А.В. Моделирование методом Монте-Карло влияния ударной ионизации на ВАХ и флуктуации тока в кремниевом диоде со структурой n^+-n-n^+ / А.В. Борздов, В.М. Борздов, В.В. Буслук // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. трудов VI Международной научной конференции, Минск, 8–9 Октября 2014. – Минск: БГУ, 2014. – С. 40.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ КП7209 В КОРПУСЕ ТО-254 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕРМОУДАРОВ

Ю. А. Бумай¹, О. С. Васьков¹, В. К. Кононенко¹, В. С. Нисс¹,
А. Ф. Керентцев², А. Н. Петлицкий², И. И. Рубцевич²

¹Белорусский национальный технический университет, bumai@tut.by

²ОАО Интеграл, akerentsev@integral.by

Методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии (ТРДС) исследована деградация внутреннего теплового сопротивления МОП-транзисторов КП7209 в корпусе ТО-254, изготовленных при различных температурных режимах и методах посадки кристалла, при воздействии термоударов в интервале от -196 до $+200$ °С. Обнаружено, что основные изменения теплового сопротивления образцов проявились в области посадки кристаллов. Полученные результаты и закономерности могут быть использованы для анализа механизмов деградации мощных полупроводниковых приборов и повышения их надежности.