

УДК 621.382.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА В СУБМИКРОННОМ КРЕМНИЕВОМ ДИОДЕ С p-n ПЕРЕХОДОМ

Борздов А.В., Борздов В.М., Кучинский П.В.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Для изучения влияния шумов на работу полупроводниковых приборов микро- и наноэлектроники необходимо детальное исследование процессов переноса носителей заряда в них. В частности, для интегральных диодов и транзисторов интерес представляет исследование временных флуктуаций таких величин, как плотности протекающего в канале тока, напряженности электрического поля в структуре, плотности заряда свободных электронов и дырок, и т. д. Численное моделирование на основе многочастичного метода Монте-Карло в данном случае является одним из наиболее эффективных методов расчета этих величин, поскольку позволяет детально учесть особенности процессов переноса носителей заряда с учетом реальной зонной структуры полупроводника, а также включать различные процессы рассеяния, в частности, ударную ионизацию [1–4].

Целью данной работы явилось моделирование токовых флуктуаций кремниевого диода со структурой p-n в случае, когда между электродами поддерживается постоянное напряжение.

Моделируемый диод имеет структуру, аналогичную рассмотренной в [2]. Основные параметры диода следующие: длина p-области составляет 0,3 мкм, длина n-области – 0,4 мкм. Уровни легирования p- и n-областей равны 10^{23} м^{-3} и $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, соответственно. Температура моделирования – 300 К. Рассматривается работа диода в режиме прямого смещения между электродами.

Полагается, что поперечные размеры диода намного больше расстояния между электродами. В этом случае учитывается изменение электрического поля и электростатического потенциала только вдоль канала диода и применяется одномерное самосогласованное моделирование, включающее решение одномерного уравнения Пуассона. Контакты электродов с полупроводником полагаются идеальными омическими. В данном случае при моделировании переноса частицы, достигающие контакта металл-полупроводник со стороны полупроводника, свободно покидают область моделирования. Металлический контакт при этом постоянно инжектирует определенное число носителей заряда в приконтактную область полупроводника, необходимое для поддержания квазинейтрального состояния в этой области. Квазиимпульсы инжектируемых частиц имеют максвелловское распределение.

Перенос электронов и дырок рассматривается в рамках аналитического закона дисперсии с учетом эффекта непараболичности в зоне про-

водимости и валентной зоне, соответственно [5]. Принимается во внимание внутримолекулярное и междолинное рассеяние электронов на фононах, рассеяние на ионизированной примеси и межзонная ударная ионизация. Для дырок учитываются процессы рассеяния на акустических и оптических фононах, рассеяние на ионизированной примеси и ударная ионизация. В отличие от [2], в настоящей работе учтены процессы ударной ионизации электронами и дырками. Соответственно, рассмотрены значения напряжений между электродами, большие 1 В, при которых вероятность этого процесса возрастает.

При использовании многочастичного метода Монте-Карло реальный ансамбль электронов и дырок заменяется меньшим ансамблем частиц с некоторым эффективным зарядом, большим элементарного (так называемый метод частиц) [6]. В рамках метода частиц рассчитывается объемная плотность заряда, входящая в уравнение Пуассона.

В рассматриваемом режиме работы диода величина плотности тока проводимости $I(t)$ определяется из следующего выражения, полученного на основании теоремы Рамо-Шокли [2–4]:

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

где L – расстояние между электродами, $N_e(t)$ и $N_h(t)$ – число электронных и дырочных частиц, находящихся в области моделирования в момент времени t , v_i и v_j – мгновенные скорости i -й электронной и j -й дырочной частиц в момент времени t , Q_e и Q_h – удельные заряды электронных и дырочных частиц (с размерностью Кл/м²). Мы полагаем $Q_e = Q_h$.

Автокорреляционные функции токовых флуктуаций определяются следующим образом [1–4]:

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

где $\delta I(t) = I(t) - \langle I \rangle$ – флуктуации суммарной плотности тока. Усреднение в (2) проводится по времени.

Спектральная плотность токовых флуктуаций S в диоде определяется на основании рассчитанных автокорреляционных функций (2) с помощью следующего выражения [1–4]:

$$S(f) = 4 \int_0^{\infty} C(t) \cos(2\pi ft) dt. \quad (3)$$

На рисунке 1 представлены рассчитанные автокорреляционные функции флуктуаций плотности тока в диоде для нескольких значений

напряжения на электродах. Сплошная кривая соответствует напряжению 1 В, штриховая кривая – 2 В, пунктирная кривая – 3 В.

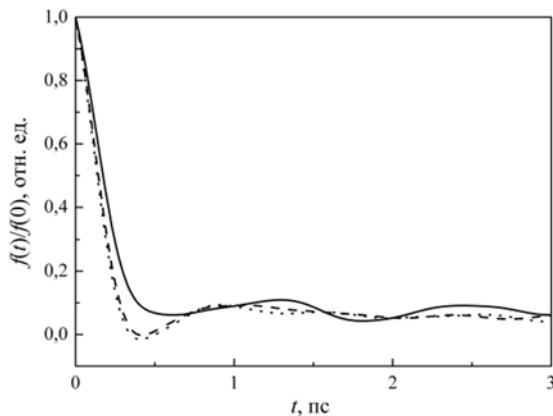


Рисунок 1 – Автокорреляционные функции токовых флуктуаций в диоде

На рисунке 2 представлены рассчитанные спектральные плотности флуктуаций плотности тока в диоде в зависимости от частоты F для этих же значений напряжения.

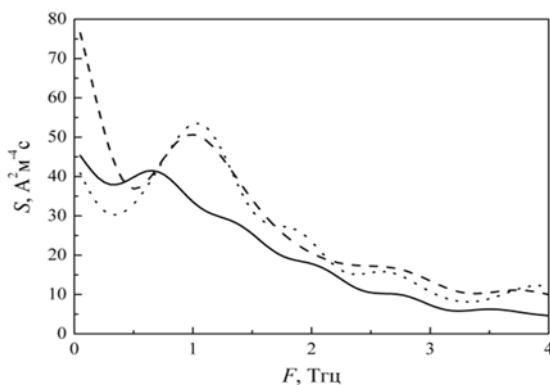


Рисунок 2 – Спектральные плотности токовых флуктуаций в диоде

Результаты расчетов автокорреляционных функций с учетом процесса ударной ионизации и их сравнение с результатами [2] показали, в частности, что с ростом напряжения между электродами наблюдается увеличение времени корреляции флуктуаций плотности тока. Зависимость спектральной плотности токовых флуктуаций от приложенного напряжения имеет более сложный характер. Как видно из рис. 2, с ростом напряжения от 1 до 2 В спектральная плотность в области низких частот ($F < 0,5$ ТГц) вначале возрастает, а затем, с увеличением напряжения до 3 В, убывает.

Такое поведение спектральной плотности токовых флуктуаций отчасти связано с особенностями протекания процесса ударной ионизации в диоде. Для более точного исследования шумовых характеристик субмикронных диодов требуется более детальное исследование протекания процесса ударной ионизации в различных условиях. В частности, важным является установление влияния на шумовые характеристики прибора используемых моделей процессов ударной ионизации электронами и дырками при их реализации в многочастичном методе Монте-Карло. Представленные на сегодняшний день в литературе модели ударной ионизации дают не только существенно отличающиеся зависимости интенсивностей этого процесса, но и приводят к различным алгоритмам определения состояния конечных частиц в результате акта ударной ионизации. Последнее, в частности, влияет на кинетические характеристики носителей заряда, и в итоге может оказывать существенное влияние на шумовые характеристики прибора.

Литература

1. Zimmerman, J. Application of Monte Carlo techniques to hot carrier diffusion noise calculation in unipolar semiconducting components / J. Zimmerman, E. Constant // *Solid-State Electron.* – 1980. – Vol. 23. – P. 915–925.
2. 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. 6975–6981.
3. Gonzalez, T. Ensemble Monte Carlo with Poisson solver for the study of current fluctuations in homogeneous GaAs structures / T. Gonzalez, D. Pardo // *J. Appl. Phys.* – 1993. – Vol. 73, No 11. – P. 7453–7464.
4. 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. 043709-1–043709-8.
5. 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.
6. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.