

Для снижения ошибок воспроизведения контейнерной составляющей в полосе фильтрации могут быть использованы методы оценивания средней частоты  $\omega_i$  контейнерной составляющей и адаптивная подстройка узкополосных фильтров, согласованных по полосе с шириной спектра контейнерной составляющей. Однако в этом случае требуется корректировать фазочастотную характеристику общего линейного компенсатора, что на практике может вызвать большие трудности. Компенсация узкополосных контейнерных составляющих в рассматриваемой системе позволяет снизить вероятность поражения спектральных составляющих широкополосного сигнала скрываемых данных  $D(t)$ .

Предельная вероятность ошибки на символ при использовании квадратурной обработки с накоплением оценки начальной фазы  $\beta_i$ ,  $i = 1, m$  в

каждом частотном канале определяется выражением

$$P_e = 1 - \Phi(\sqrt{q_0 k})$$

где  $q_0$  – отношение сигнал/шум в канале,  $k < 1$  – коэффициент, учитывающий потери за счёт ошибок оценивания  $\alpha_i^*$  и задержки  $\tau^*$  псевдослучайной последовательности.

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Чердынцев В.А., Деев Н.А. Подавление комплекса помех в каналах связи / В.А. Чердынцев, Н.А. Деев // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 2. – С. 31–36.
3. Хорошко В.А., Чекатков А.А. Методы и средства защиты информации. – М.: Юниор, 2010. – 501 с.

УДК 621.382.2

## СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ТОКОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В СУБМИКРОННОМ КРЕМНИЕВОМ ДИОДЕ

Борздов А.В., Борздов В.М., Кучинский П.В., Сперанский Д.С.

Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

В связи с уменьшением геометрических 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 [1–3]. При этом особое внимание уделяется изучению влияния процессов генерации-рекомбинации носителей заряда на их шумовые характеристики. К таким процессам можно отнести лавинное умножение носителей заряда в результате ударной ионизации [4]. В настоящее время все большее значение при исследовании шумовых характеристик приборов приобретает численное самосогласованное моделирование переноса носителей заряда. Известно, что одним из наиболее перспективных численных методов решения данной задачи является многочастичный метод Монте-Карло, поскольку он позволяет детально исследовать физику этого процесса. Обзор основных проблем, возникающих при моделировании шумов методом Монте-Карло, приведен в [5].

Целью данной работы явилось исследование шумовых характеристик кремниевого диода со структурой  $n^+ - n - n^+$  в режиме токовых флукту-

аций в случае, когда к электродам приложено постоянное напряжение.

В качестве объекта моделирования нами выбрана диодная структура, аналогичная рассматриваемой в [6] со следующими параметрами: размеры  $n^+$ -областей, а также  $n$ -канала  $L_1 = 100$  нм,  $L_2 = 100$  нм,  $L_3 = 100$  нм (см. рис. 1). Уровни легирования  $n^+$ -областей и  $n$ -канала равны  $10^{25} \text{ м}^{-3}$  и  $10^{22} \text{ м}^{-3}$ , соответственно. Температура моделирования принималась равной 300 К.

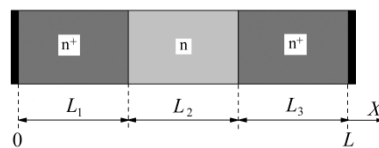


Рисунок 1 – Структура моделируемого диода

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. В данном случае при моделировании переноса носителей при моделировании контакта металл-полупроводник со стороны полупроводника, свободно покидают область моделирования. Металлический контакт при этом постоянно инжект-

тирует определенное число носителей заряда в приконтактную область полупроводника, необходимое для поддержания квазинейтрального состояния в этой области. Инжектируемые частицы имеют максвелловское распределение по импульсам.

Перенос электронов и дырок рассматривался с учетом эффекта непараболичности и анизотропии законов дисперсии по аналогии с тем, как это было сделано для кремниевого субмикронного МОП-транзистора в [7]. Учитывалось внутридолинное 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.

В режиме токовых флуктуаций, при котором на электродах диода поддерживается постоянное напряжение, ток смещения можно положить равным нулю, а величина тока проводимости  $I(t)$  задается следующим выражением, полученным на основании теоремы Рамо-Шокли [2, 4]:

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

где  $L = L_1 + L_2 + L_3$  – 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  $t$ . При моделировании методом Монте-Карло используется так называемый метод частиц [8], 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.

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 [1–4]. Усреднение в (2) проводится по времени.

Спектральная плотность флуктуаций плотности тока в диоде  $S$  может быть получена с использованием автокорреляционных функций (2) и определяется следующим выражением [1]:

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

На рисунке 2 представлены рассчитанные спектральные плотности флуктуаций плотности

тока в диоде в зависимости от частоты  $f$  для напряжений на электродах, равных 1 В (кривые 1), 2 В (кривые 2) и 3 В (кривые 3).

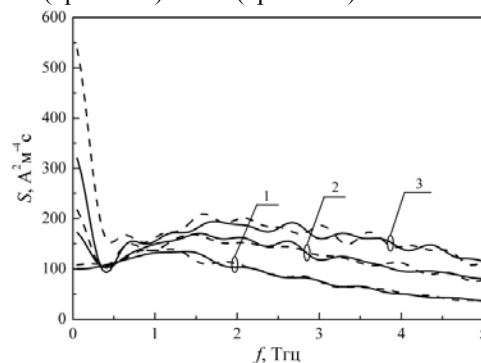


Рисунок 2 – Спектральные плотности флуктуаций плотности тока в диоде. Сплошные кривые — без учета ударной ионизации, штриховые кривые — с учетом этого процесса

При моделировании шумовых характеристик диода принимался во внимание только процесс ударной ионизации электронами. Интенсивность этого процесса рассчитывалась в рамках модели Келдыша с мягким порогом, параметры для которой даны в [9].

Результаты проведенных расчетов показали, в частности, что процесс ударной ионизации оказывает заметное влияние не только на величину плотности тока в рассматриваемом субмикронном кремниевом диоде при напряжениях между электродами, больших 1 В [10], но и на шумовые характеристики прибора. Как видно из рис. 2, процесс ударной ионизации приводит к увеличению спектральной плотности флуктуаций в области низких частот. Увеличение напряжения между электродами диода, в свою очередь, ведет к увеличению спектральной плотности флуктуаций как в области низких частот, так и в области частот, больших 1 ТГц.

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. Rengel, R. A microscopic interpretation of the RF noise performance of fabricated FDSOI MOSFETs / R. Rengel [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 2006. – Vol. 53, No 3. – P. 523–532.
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. 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. 496–503.
  6. 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. 1–4.
  7. Борздов, В.М. Оценка эффективной пороговой энергии межзонной ударной ионизации в глубокосубмикронном кремниевом p-канальном МОП-транзисторе / В.М. Борздов [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 188–192.
  8. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
  9. Ridley, В.К. Soft-threshold lucky drift theory of impact ionization in semiconductors / В.К. Ridley // Semiconductor Science and Technology. – 1987. – No. 22. – P. 116–122.
  10. Борздов, А.В. Моделирование методом Монте-Карло влияния ударной ионизации на ВАХ и флуктуации тока в кремниевом диоде со структурой p<sup>+</sup>-n-p<sup>+</sup> / А.В. Борздов, В.М. Борздов, В.В. Буслюк // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. трудов VI Международной научной конференции, Минск, 8–9 Октября 2014. – Минск: БГУ, 2014. – С. 40–43.

УДК 621.382

### ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОМ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОМОЩНЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ

Бумай Ю.А.<sup>1</sup>, Бобученко Д.С.<sup>1</sup>, Трофимов Ю.В.<sup>2</sup>, Цвирко В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>РНПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь

Ультразвуковое воздействие на светоизлучающие диоды (СИД), вызывающее интенсивные механические колебания во всех их элементах, может быть использовано для выявления потенциально ненадежных приборов. В кристаллах СИД оно может вызывать образование точечных дефектов структуры, протяженных дефектов – дислокаций и их миграцию. Проведена обработка ультразвуком (180 кГц, ~12 Вт, до 122 часов) InGaN/GaN СИД фирмы Nichia (NSPB510S) синего свечения. В соответствии с рисунком 1 для данных СИД наблюдались достаточно сильные изменения вольтамперных характеристик (ВАХ), измеренных в режиме стабилизации тока.

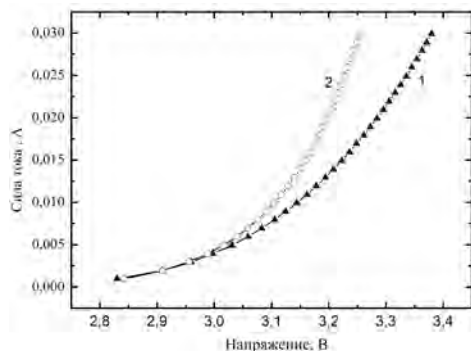


Рисунок 1 – Вольтамперная характеристика СИД № 7 до (1) и после (2) ультразвуковой обработки в течение 90 часов

На первой стадии обработки наблюдалось смещение прямой ветви ВАХ в сторону более низких напряжений смещения. На рисунке 2 приведена зависимость прямого напряжения СИД № 7 при токе 30 мА от времени ультразвуковой обработки. В течение первых 40 часов (временной интервал 1) на пьезокерамике, генерирующей ультразвук, находилась эпоксидная линза СИД. Снижение напряжения проходило со скоростью 0,46 мВ/час. После этого периода на пьезокерамике располагались электроды СИД. Снижение напряжения проходило с большей скоростью 2,75 мВ/час. В результате на протяжении следующих 50 часов ультразвуковой обработки (временной интервал 2) наблюдалось уменьшение прямого напряжения на 120 мВ. После 90 часов обработки (область 3) наблюдались колебания ВАХ, а через 122 часов произошел пробой СИД. ВАХ СИД стала линейной, сопротивление составило 20 Ом.

При этом необходимо отметить отсутствие временных нестабильностей ВАХ обработанных ультразвуком СИД, они достаточно точно воспроизводились при повторных измерениях через сутки (т.е. колебания напряжения СИД со временем обработки являлись объективными). Возможной причиной такого поведения является то, что под действием ультразвука происходит