

**Samoilov Leonty Konstantinovich** – Southern Federal University; e-mail: lksamoilov@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371638; the department of information measurement technologies and systems; dr. of eng. sc.; professor.

**Denisenko Darya Yurievna** – e-mail: d.y.denisenko@yandex.ru; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Titov Alexey Evgenievich** – e-mail: aetitov@sfnu.ru; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.382.32: 621.314

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-175-183

**Б.Г. Коноплев**

### **АНАЛИЗ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОМЕТРОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ В ДИОДНОМ ВКЛЮЧЕНИИ ПРИ СВЕРХНИЗКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ**

*Успехи микроэлектроники, особенно развитие КМОП-технологии, обеспечили возможность создания приборов с чрезвычайно низкой потребляемой мощностью. Это позволило разрабатывать автономные беспроводные приборы, которые обеспечивают с использованием радиоволн не только прием, обработку и передачу информации, но и получение мощности питания от терминалов. Более того, для беспроводного и безбатарейного питания может применяться собирание радиочастотной энергии из окружающей среды: энергии излучения станций сотовой связи, радиотелевизионных станций, СВЧ-печей, Wi-Fi, Bluetooth и др. источников. Для преобразования радиочастотной энергии в напряжение питания чаще всего применяются выпрямители на основе нанометровых МОП-транзисторов в диодном включении. Когда устройства с беспроводным питанием находятся далеко от терминала или собирают энергию для питания из окружающей среды, плотность мощности электромагнитного поля и, следовательно, амплитуда входного напряжения может быть весьма малой. Поэтому актуальной является задача разработки и исследования таких устройств, способных работать при очень низких входных напряжениях. Целью исследования является анализ выпрямительных свойств диодов на основе нанометровых МОП-транзисторов в режиме слабой инверсии при сверхнизких входных напряжениях и выработка рекомендаций по выбору технологии и проектированию микросхем с беспроводным питанием. Получены выражения для оценки коэффициентов выпрямления диодов по току и по мощности. Выполнены расчеты по полученным выражениям и моделирование с использованием модели BSIM4v4.8.2 вольтамперных характеристик и зависимостей коэффициентов выпрямления диодов по току и по мощности от напряжения для типовой КМОП-технологии 90 нм. Показана возможность построения выпрямителей на основе МОП-транзисторов при сверхнизких напряжениях вплоть до единиц мВ. Даны рекомендации по обоснованию технологических и конструктивных параметров при проектировании модулей преобразования и собирания энергии беспроводных устройств.*

*Интернет вещей; беспроводная передача; собирание и преобразование энергии; диоды; нанометровые МОП-транзисторы; подпороговый режим; коэффициент выпрямления.*

**B.G. Konoplev**

### **ANALYSIS OF THE RECTIFYING PROPERTIES OF NANOMETER MOS TRANSISTORS IN A DIODE CONNECTION AT ULTRALOW VOLTAGE**

*Advances in microelectronics, especially the development of CMOS technology, have made it possible to create devices with extremely low power consumption. This made it possible to develop autonomous wireless devices that, using radio waves, not only receive, process, and transmit information, but also receive power from the terminals. For wireless and battery-free power supply, harvesting of radio frequency energy from the environment can be used: radiation energy from cellular stations, radio and television stations, microwave ovens, Wi-Fi, Bluetooth, and other sources. To convert radio frequency energy into supply voltage, rectifiers based on nanometer diode-connected MOSFETs are most often used. When wireless powered devices are located far from the terminal or harvest energy from the environment, the power density of the electromagnetic field and therefore the amplitude of the input voltage can be quite small. The urgent task is to develop and study such devices capable of operating at very low input voltage.*

*es. The purpose of the study is to analyze the rectifying properties of diodes based on nanometer MOSFETs in weak inversion mode at ultra-low input voltages and to develop recommendations for the choice of technology and design of microcircuits with wireless power. Expressions are obtained for estimating the rectification coefficients of diodes in terms of current and power. Calculations using the obtained expressions and modeling using the BSIM4v4.8.2 model of current-voltage characteristics and dependences of diode rectification coefficients for current and power on voltage for a typical 90 nm CMOS technology were performed. The possibility of constructing rectifiers based on MOSFETs at ultra-low voltages down to units of mV has been demonstrated. Recommendations are given for justifying technological and design parameters when designing modules for converting and harvesting energy of wireless devices.*

*Internet of Things; wireless transmission; harvesting and conversion of energy; diodes; nanometer MOSFETs; subthreshold mode; rectification coefficient.*

**Введение.** В конце 19-го века практически одновременно с изобретением А.С. Поповым и Г. Маркони радио для передачи информации Н. Тесла провел опыты по беспроводной передаче на большие расстояния электрической энергии значительной мощности посредством излучения и приема радиоволн [1]. Однако, несовершенство аппаратуры в то время и в последующие сто лет не позволило эффективно применять беспроводную передачу энергии для питания приборов вместо использования в качестве источников питания батарей или сети переменного тока.

Успехи микроэлектроники, особенно развитие КМОП-технологии, обеспечили возможность создания приборов с потребляемой мощностью порядка мили-, микро-, нано- и даже пиковатт [2, 3]. Это, в свою очередь, позволило разрабатывать полностью автономные беспроводные приборы, которые обеспечивают с использованием радиоволн не только прием, обработку и передачу информации, но и получение мощности питания от терминалов [4]. Более того, для беспроводного и безбатарейного питания может применяться соби́рание радиочастотной энергии из окружающей среды (Energy Harvesting – EH): энергии излучения станций сотовой связи, радиотелевизионных станций, СВЧ-печей, Wi-Fi, Bluetooth и др. источников [5–8]. Нас окружает «океан» бесплатной энергии [8–13].

Соби́рающие энергию питания из окружающей среды беспроводные устройства радиочастотной идентификации, контроля доступа, систем логистики, медицинских имплантатов, сенсорные сети «интернета вещей» (Internet of Things – IoT) и, далее, «интернета всего» (Internet of Everything – IoE) позволяют обеспечить новый уровень информатизации и повышения эффективности многих сфер жизни человека [14, 15].

Для преобразования радиочастотной энергии в напряжение питания чаще всего применяются выпрямители на основе нанометровых МОП-транзисторов в диодном включении [16, 17]. Это обусловлено полной технологической совместимостью таких выпрямителей в составе КМОП-микросхем, и, следовательно, минимальной стоимостью, что является определяющим при массовом производстве приборов.

Когда устройства с беспроводным питанием находятся далеко от терминала или собирают энергию для питания из окружающей среды, плотность мощности электромагнитного поля и, следовательно, амплитуда входного напряжения может быть весьма малой. Поэтому актуальной является задача разработки и исследования таких устройств, способных работать при очень низких входных напряжениях.

Целью исследования является анализ выпрямительных свойств диодов на основе нанометровых МОП-транзисторов в режиме слабой инверсии при сверхнизких входных напряжениях и выработка рекомендаций по выбору технологии и проектированию микросхем с беспроводным питанием.

**Преобразователи радиочастотной энергии на основе МОП-транзисторов при сверхнизких входных напряжениях.** На рис. 1 показана упрощенная схема соби́рания радиочастотной энергии [5, 16].

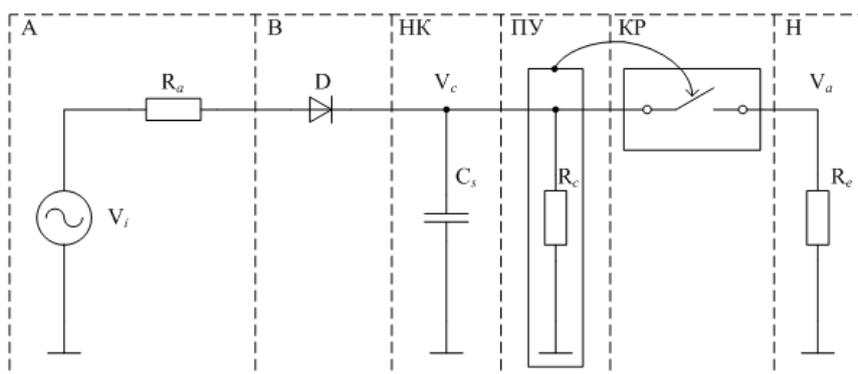


Рис. 1. Упрощенная схема сбора радиочастотной энергии: А – антенна; В – выпрямитель/умножитель напряжения; НК – накопительный конденсатор; ПУ – пороговое управляющее устройство; КР – ключ-регулятор напряжения; Н – нагрузка

Рассмотрим протокол работы микросистемы с сбором энергии, временная диаграмма накопления и расходования энергии которой представлена на рис. 2.

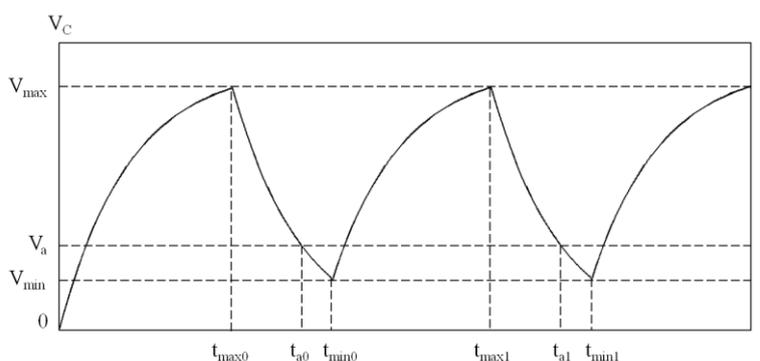


Рис. 2. Временная диаграмма накопления и расходования энергии

В фазе накопления энергии ключ *КР* (см. рис. 1) разомкнут. Эквивалентная схема антенны включает источник высокочастотного напряжения  $V_i$  и сопротивление антенны  $R_a$ . Принятый антенной сигнал подается на выпрямитель/умножитель напряжения (на рис. 1 условно показан в виде одного диода  $D$ ). Для повышения чувствительности применяют многокаскадные выпрямители/умножители напряжения на МОП-транзисторах в диодном включении [18]. Обычно между антенной и выпрямителем/умножителем включается схема согласования импедансов [5] (на рис. 1 для упрощения не показана). Собранная из внешней среды энергия накапливается на конденсаторе  $C_s$  пока напряжение на нём не достигнет достаточного уровня, при котором возможна активная работа микросистемы (например, обработка и передача данных).

При достижении напряжения на конденсаторе уровня  $V_{max}$  пороговое управляющее устройство разрешает замыкание ключа, и микросистема переходит в фазу расходования энергии, передавая ее в нагрузку  $R_l$ . Ключ-регулятор в этой фазе поддерживает на нагрузке постоянное напряжение  $V_a$ .

Время  $t_{max0}$  заряда накопительного конденсатора до напряжения  $V_{max}$  зависит от мощности, поступающей в антенну, эффективности выпрямителя, ёмкости конденсатора и уровня мощности, потребляемой пороговым управляющим устройством (на рис. 1 отражено сопротивлением  $R_c$ ).

В течение достаточно длительного времени даже при небольшой входной мощности  $P_s$  накопительный конденсатор может зарядиться собираемой энергией до требуемого для работы микросистемы напряжения. Время накопления энергии  $t_s$  равно  $t_{max0}$  при холодном старте или  $t_{max1} - t_{min0}$  при горячем старте (см. рис. 2).

Накопленный заряд используется для питания микросистемы мощностью  $P_d$  в течение времени  $t_d = t_{ai} - t_{maxi}$ . При  $P_d \gg P_s$  длительность фазы накопления энергии значительно больше длительности фазы расходования энергии  $t_s \gg t_d$ .

Как только напряжение на конденсаторе становится меньше  $V_{min}$ , система возвращается в режим собирания энергии. При малом удалении источника мощности, например, в системах оплаты транспортных услуг,  $P_d < P_s$  и фазы накопления и расходования энергии совмещаются, тогда снижения напряжения на конденсаторе при  $t > t_{maxi}$  (см. рис. 2) не происходит.

**Исследование выпрямительных свойств диодов на основе МОП-транзисторов при сверхнизких входных напряжениях.** Для повышения эффективности многокаскадных выпрямителей/умножителей напряжения выводы оснований МОП-транзисторов соединяют с выводами стоков, как показано на рис. 3 [18, 19]. Это позволяет для всех каскадов устранить влияние потенциала подложки на пороговое напряжение транзисторов [18]. Кроме того, такое соединение, в отличие от варианта соединения основания с истоком, предотвращает шунтирование МОП-транзистора прямосмещенным  $pn$ -переходом сток-основание при больших обратных напряжениях, подаваемых на выпрямитель [19].

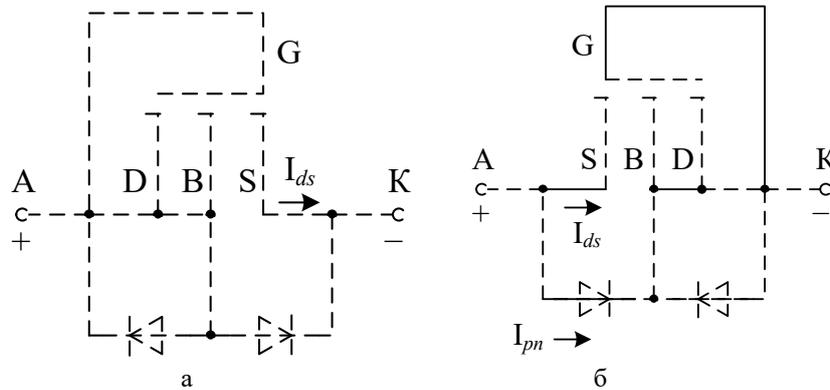


Рис. 3. Диодное включение МОП-транзисторов: а) nМОП; б) рМОП; S – исток; D – сток; В – основание; G – затвор; А – анод диода; К – катод диода; пунктирами показаны  $p$ - $n$ -переходы исток-основание, сток-основание

При сверхнизких входных напряжениях МОП-транзисторы выпрямителя/умножителя работают в режиме слабой инверсии [18, 20], а при прямом смещении  $pn$ -перехода сток-основание (см. рис. 3) имеет место суперпозиция МОП-транзистора в режиме слабой инверсии и биполярного транзистора исток-основание-сток [21].

Подпороговый ток сток-исток  $n$ МОП-транзистора в режиме слабой инверсии определяется выражением [21, 22]:

$$I_{ds} = I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_g - V_{th} - n \cdot V_s}{n \cdot \phi_T}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{V_s - V_d}{\phi_T}\right)\right), \quad (1)$$

$$I_0 = 2 \cdot \mu \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d} \cdot \frac{W}{L} \cdot n \cdot \phi_T^2,$$

где  $n$  – параметр наклона вольтамперной характеристики транзистора в подпороговой области [2];  $\phi_T$  – тепловой потенциал;  $\mu$  – подвижность носителей заряда в канале;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $d$  – толщина подзатворного диэлектрика;  $W$  – эффективная ширина канала;  $L$  – эффективная длина канала;  $V_{th}$  – пороговое напряжение;  $V_g, V_s, V_d$  – напряжения затвора, истока и стока, соответственно, относительно потенциала основания  $V_b$ .

В диодном включении (см. рис. 3,а) выводы затвора, стока и основания объединены, и, следовательно, их потенциалы одинаковы. Если положить потенциал основания равным нулю, то  $V_b = V_g = V_d = 0$ . Тогда из (1) получим:

$$I_{ds} = I_{ds0} \cdot \left( \exp\left(\frac{-V_s}{\varphi_T}\right) - 1 \right), \quad (2)$$

$$I_{ds0} = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-V_{th}}{n \cdot \varphi_T}\right).$$

В выражении (2) значения  $V_s < 0$  соответствуют прямому смещению диода (см. рис. 3,а) и прямому току  $I_{ds}^+$ , а значения  $V_s > 0$  – обратному смещению и обратному току  $I_{ds}$ . С учетом этого можно получить выражение для коэффициента выпрямления по току:

$$K_I = \frac{I_{ds}^+}{I_{ds}^-} = \left( \exp\left(\frac{V}{\varphi_T}\right) - 1 \right) / \left( 1 - \exp\left(\frac{-V}{\varphi_T}\right) \right), \quad (3)$$

где  $V$  – напряжение на диоде.

При работе в выпрямителях в подпороговом режиме ток в цепи заряда конденсатора  $C_s$  определяется нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ) диода на основе МОП-транзистора, так как сопротивление диода значительно превышает сопротивление других участков цепи. Пусть входной сигнал имеет форму меандра. За время положительной части входного импульса  $t^+$  через прямосмещенный диод в конденсатор передается энергия  $Q^+$  определяемая величиной мощности  $P^+$ , выражение для которой можно получить из (2):

$$P^+ = \int_{V_{i-1}}^{V_i} I_{ds}(V) dV = I_{ds0} \cdot \left( \varphi_T \cdot \left( \exp\left(\frac{V_i}{\varphi_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{i-1}}{\varphi_T}\right) \right) - V_i + V_{i-1} \right), \quad (4)$$

где  $V_{i-1}$ ,  $V_i$  – напряжение на диоде до и после воздействия положительной части входного  $i$ -го импульса.

За время отрицательной части входного импульса  $t^-$  через обратносмещенный диод конденсатор разряжается на величину энергии  $Q^-$  определяемой мощностью  $P^-$ , выражение для которой можно получить из (2):

$$P^- = \int_{-V_i}^{-V_{i+1}} I_{ds}(V) dV = I_{ds0} \cdot \left( \varphi_T \cdot \left( \exp\left(\frac{-V_{i+1}}{\varphi_T}\right) - \exp\left(\frac{-V_i}{\varphi_T}\right) \right) + V_{i+1} - V_i \right), \quad (5)$$

где  $-V_i$ ,  $-V_{i+1}$  – напряжение на диоде до и после воздействия отрицательной части входного  $i$ -го импульса.

Оценим величину приращения напряжения  $\Delta V_i$  на конденсаторе за период входного импульса  $T$ . За время  $T$  при  $T \ll t_s$  в конденсатор передается энергия:

$$Q_i = Q_i^+ - Q_i^- \cong P_i^+ \cdot t^+ - P_i^- \cdot t^- \cong (P_i^+ - P_i^-) \cdot T/2 \cong C_s \cdot \Delta V_i^2/2. \quad (6)$$

Тогда из (6):

$$\Delta V_i \cong \sqrt{\left( (P_i^+ - P_i^-) \cdot \frac{T}{C_s} \right)}. \quad (7)$$

Коэффициент выпрямления по мощности можно получить из (4, 5) как  $K_P = P^+/P^-$ . Этот параметр лучше характеризует выпрямительные свойства диодов на основе МОП-транзисторов по сравнению с параметром  $K_I$ , так как учитывает нелинейность ВАХ в диапазоне изменения напряжений на диоде.

Для оценки  $K_P$  можно положить в (4)  $V_{i-1}=0$  и в (5)  $V_i=0$ . Тогда из (4, 5) получим:

$$K_P = P^+/P^- = \left( \varphi_T \cdot \left( \exp\left(\frac{V}{\varphi_T}\right) - 1 \right) - V \right) / \left( \varphi_T \cdot \left( \exp\left(\frac{-V}{\varphi_T}\right) - 1 \right) + V \right). \quad (8)$$

Из анализа (3, 8) следует, что при выпрямляемом напряжении  $V > 0$  коэффициенты выпрямления  $K_I > 1$  и  $K_P > 1$ , и, следовательно, диод на МОП-транзисторе потенциально может сохранять выпрямительные свойства при сколь угодно малых входных напряжениях.

Здесь следует отметить, что выражения (1-5, 8) получены для идеализированной модели, не учитывающей ряд физических процессов в реальных нанометровых МОП-транзисторах [22, 23], а также влияние  $pn$ -перехода исток-основание, включенного параллельно МОП-транзистору (см. рис. 3). В нанометровых МОП-транзисторах существенное влияние на токи утечки, кроме подпорогового тока, могут оказывать токи  $pn$ -переходов, короткоканальный эффект, ток затвора за счет туннельного эффекта и инжекции горячих носителей, GIDL-эффект (ток утечки, индуцированный затвором на сток или исток). На подпороговый ток существенное влияние оказывают DIBL-эффект (индуцированное стоком или истоком снижение порогового напряжения), эффект подложки, зависимость порогового напряжения от длины и ширины канала [23].

При проектировании СБИС применяют современные САПР, включающие достаточно точные подсистемы моделирования. В настоящей работе в среде схемотехнического моделирования Tanner EDA (T-Spice) использовалась модель BSIM4v4.8.2 [24], учитывающая особенности конструкции и физических процессов в наноразмерных МОП-транзисторах и включающая более двухсот параметров. Параметры модели соответствуют МОП-транзисторам с низкими токами утечки, изготовленным по технологии КМОП 90 нм [25]. В [18] показано, что в многокаскадных выпрямителях/умножителях, выполняемых по типовым КМОП-технологиям с изолированными карманами для размещения  $p$ МОП-транзисторов, целесообразно применять именно  $p$ -канальные транзисторы.

На рис. 4 представлены результаты расчетов по формулам (2, 3, 8) и моделирования в среде T-Spice характеристик диодов на основе  $p$ МОП-транзисторов.

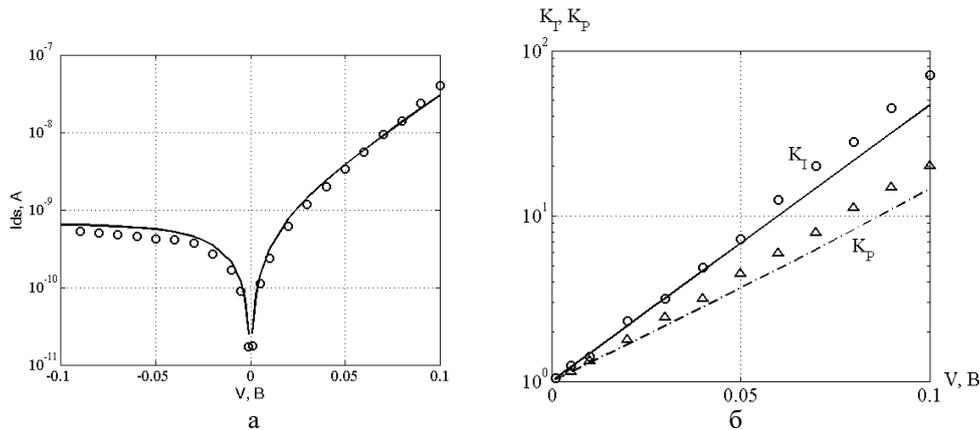


Рис. 4. Вольтамперные характеристики (а) и коэффициенты выпрямления (б) диода при сверхнизких напряжениях; ключевые параметры:  $V_{th} = -0.32$  В,  $\mu = 0.027$  м/В\*с,  $d = 1.2$  нм,  $W/L = 14.8$ ,  $n = 1.2$ ; результаты расчетов показаны сплошными и штрих-пунктирными кривыми, результаты моделирования – значками  $\circ$  и  $\Delta$

Для построения зависимости коэффициента выпрямления  $K_P$  от напряжения  $V$  применялось численное интегрирование результатов моделирования ВАХ. Отклонение результатов расчета по формулам от более точных результатов моделирования объясняется учетом в модели BSIM4v4.8.2 особенностей конструкции и физических процессов в наноразмерных МОП-транзисторах.

Анализ результатов расчетов и моделирования (см. рис. 4) и формул (4-7) показывает возможность построения выпрямителей на основе МОП-транзисторов при сверхнизких напряжениях вплоть до единиц мВ, при этом время накопления энергии  $t_s$  может быть весьма большим. Выбирая электрофизические, структурные и топологические параметры транзисторов в соответствии с выражениями (1, 2), можно в определенных пределах управлять величиной приращения напряжения  $\Delta V_i$  и временем  $t_s$ .

**Заключение.** В работе проведено исследование выпрямительных свойств диодов на основе МОП-транзисторов при сверхнизких напряжениях, которые являются основой модулей преобразования и сбора энергии беспроводных устройств.

Получены выражения для оценки коэффициентов выпрямления диодов по току и по мощности. Выполнены расчеты по полученным выражениям и моделирование с использованием модели BSIM4v4.8.2 ВАХ и зависимостей коэффициентов выпрямления диодов по току и по мощности от напряжения для типовой КМОП-технологии 90 нм. Показана возможность построения выпрямителей на основе МОП-транзисторов при сверхнизких напряжениях вплоть до единиц мВ. Даны рекомендации по обоснованию технологических и конструктивных параметров при проектировании модулей преобразования и сбора энергии беспроводных устройств.

Результаты могут быть полезны для разработчиков беспроводных микроустройств.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Из истории изобретения и начального периода развития радиосвязи / под. ред. проф. В.Н. Ушакова. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. – 288 с.
2. Wang A., Calhoun B.H., Chandrakasan A.P. Sub-threshold Voltage Circuit Design for Ultra Low Power Systems. – New York: Springer, 2006. – 209 p.
3. Reynders N., Dehaene W. Ultra-Low-Voltage Design of Energy-Efficient Digital Circuits. – New York: Springer, 2015. – 192 p.
4. Shinohara N. Wireless Power Transfer via Radiowaves. – London: ISTE Ltd., 2014. – 238 p.
5. Tran L.-G., Cha H.-K., Park W.-T. RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications // Micro and Nano Systems Letters. – 2017. – Vol. 5, No. 14. – P. 1-16.
6. Clerckx B., Zhang R., Schober R., Ng D.W.K., Kim D.I., Poor H.V. Fundamentals of Wireless Information and Power Transfer: From RF Energy Harvester Models to Signal and System Designs // IEEE J. on selected areas in communications. – 2019. – Vol. 37, No. 1. – P. 4-33.
7. Smith J.R. Wirelessly Powered Sensor Networks and Computational RFID. – New York: Springer, 2013. – 271 p.
8. Luo Y., Pu L., Wang G., Zhao Y. RF Energy Harvesting Wireless Communications: RF Environment, Device Hardware and Practical Issues // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – Article 3010. – 28 p.
9. Visser H.J., Reniers A.C.F., Theeuwes J.A.C. Ambient RF Energy Scavenging: GSM and WLAN Power Density Measurements // Proceedings of the 38th European Microwave Conference. – October 2008, The Netherlands, Amsterdam. – P. 721-724.
10. Pinuela M., Mitcheson P.D., Lucyszyn S. Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2013. – Vol. 61, No. 7. – P. 2715-2726.
11. Alhekail Z.O., Hadi M.A., Alkanhal M.A. Public safety assessment of electromagnetic radiation exposure from mobile base stations // J. of radiological protection. – 2012. – Vol. 32. – P. 325-337.
12. Pinuela M., Yates D. C., Mitcheson P.D., Lucyszyn S. London RF Survey for Radiative Ambient RF Energy Harvesters and Efficient DC-load Inductive Power Transfer // 7th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2013). – IEEE, 2013. – P. 2839-2843.
13. Vyas R.J., Cook B.B., Kawahara Y., Tentzeris M.M. E-WEHP: A Batteryless Embedded Sensor-Platform Wirelessly Powered from Ambient Digital-TV Signals // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2013. – Vol. 61, No 6. – P. 2491-2505.
14. International Roadmap for Devices and Systems. More than Moore White Paper. – IEEE, 2022. – 56 p.
15. International Roadmap for Devices and Systems. Executive Summary. – IEEE, 2022. – 76 p.
16. Коноплев Б.Г., Синюкин А.С. Исследование выпрямителей на основе наноразмерных МОП-транзисторов для микросистем с беспроводным питанием // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 2 (196). – С. 105-113.
17. Синюкин А.С., Коноплев Б.Г. Исследование влияния параметров наноразмерных МОП-транзисторов на характеристики преобразователей энергии для пассивных беспроводных устройств // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 6 (208). – С. 15-24.
18. Sinyukin A.S., Konoplev B.G. Integrated CMOS Microwave Power Converter for Passive Wireless Devices // Russian Microelectronics. – 2021. – Vol. 50, No. 3. – P. 189-196.
19. Shokrani M.R., Khoddam M., Hamidon M.N.B., Kamsani N.A., Rokhani F.Z., Shafie S.B. An RF Energy Harvester System Using UHF Micropower CMOS Rectifier Based on a Diode Connected CMOS Transistor // The Scientific World Journal. – 2014. – Vol. 2014. – Article 963709. – 11 p.

20. Enz C.C., Krummenacher F., Vittoz E.A. An Analytical MOS Transistor Model Valid in All Regions of Operation and Dedicated to Low-Voltage and Low-Current Applications // *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. – 1995. – No. 8. – P. 83-114.
21. Enz C.C., Vittoz E.A. Modeling for Low-Voltage and Low-Power Analog IC Design // *Microelectronic Engineering*. – 1997. – Vol. 39. – P. 59-76.
22. Enz C.C., Vittoz E.A. Charge-based MOS Transistor Modeling. The EKV model for low-power and RF IC design. – London: John Wiley & Sons Ltd., 2006. – 303 p.
23. Roy K., Mukhopadhyay S., Mahmoodi-Meimand H. Leakage Current Mechanisms and Leakage Reduction Techniques in Deep-Submicrometer CMOS Circuits // *Proceedings of the IEEE*. – 2003. – Vol. 91, No. 2. – P. 305-327.
24. Hu C., Niknejad A.M., Chauhan S.Y. BSIM4v4.8.2 MOSFET Model – User’s Manual. – USA, CA, Berkeley: University of California, 2020. – 176 p.
25. Sicard E., Bendhia S.D. Basics of CMOS Cell Design. – USA: McGraw-Hill, 2007. – 429 p.

## REFERENCES

1. Iz istorii izobreteniya i nachal'nogo perioda razvitiya radiosvyazi [Iz istorii izobreteniya i nachalnogo perioda razvitiya radiosvyazi], ed. by prof. V.N. Ushakova. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2008, 288 p.
2. Wang A., Calhoun B.H., Chandrakasan A.P. Sub-threshold Voltage Circuit Design for Ultra Low Power Systems. New York: Springer, 2006, 209 p.
3. Reynders N., Dehaene W. Ultra-Low-Voltage Design of Energy-Efficient Digital Circuits. New York: Springer, 2015, 192 p.
4. Shinohara N. Wireless Power Transfer via Radiowaves. London: ISTE Ltd., 2014, 238 p.
5. Tran L.-G., Cha H.-K., Park W.-T. RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications, *Micro and Nano Systems Letters*, 2017, Vol. 5, No. 14, pp. 1-16.
6. Clerckx B., Zhang R., Schober R., Ng D.W.K., Kim D.I., Poor H.V. Fundamentals of Wireless Information and Power Transfer: From RF Energy Harvester Models to Signal and System Designs, *IEEE J. on selected areas in communications*, 2019, Vol. 37, No. 1, pp. 4-33.
7. Smith J.R. Wirelessly Powered Sensor Networks and Computational RFID. New York: Springer, 2013, 271 p.
8. Luo Y., Pu L., Wang G., Zhao Y. RF Energy Harvesting Wireless Communications: RF Environment, Device Hardware and Practical Issues, *Sensors*, 2019, Vol. 19, Article 3010, 28 p.
9. Visser H.J., Reniers A.C.F., Theeuwes J.A.C. Ambient RF Energy Scavenging: GSM and WLAN Power Density Measurements, *Proceedings of the 38th European Microwave Conference. October 2008, The Netherlands, Amsterdam*, pp. 721-724.
10. Pinuela M., Mitcheson P.D., Lucyszyn S. Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, Vol. 61, No. 7, pp. 2715-2726.
11. Alhekail Z.O., Hadi M.A., Alkanhal M.A. Public safety assessment of electromagnetic radiation exposure from mobile base stations, *J. of radiological protection*, 2012, Vol. 32, pp. 325-337.
12. Pinuela M., Yates D. C., Mitcheson P.D., Lucyszyn S. London RF Survey for Radiative Ambient RF Energy Harvesters and Efficient DC-load Inductive Power Transfer, *7th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2013)*. IEEE, 2013, pp. 2839-2843.
13. Vyas R.J., Cook B.B., Kawahara Y., Tentzeris M.M. E-WEHP: A Batteryless Embedded Sensor-Platform Wirelessly Powered from Ambient Digital-TV Signals, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 2013, Vol. 61, No 6, pp. 2491-2505.
14. International Roadmap for Devices and Systems. More than Moore White Paper. IEEE, 2022, 56 p.
15. International Roadmap for Devices and Systems. Executive Summary. IEEE, 2022, 76 p.
16. Konoplev B.G., Sinyukin A.S. Issledovanie vypyramiteley na osnove nanorazmernykh MOP-tranzistorov dlya mikrosistem s besprovodnym pitaniem [Research of rectifiers based on nanoscale MOS-devices for microsystems with wireless power supply], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 2 (196), pp. 105-113.
17. Sinyukin A.S., Konoplev B.G. Issledovanie vliyaniya parametrov nanorazmernykh MOP-tranzistorov na kharakteristiki preobrazovateley energii dlya passivnykh besprovodnykh ustroystv [Research of the influence of parameters of nano-sized MOSFETs on the characteristics of energy converters for passive wireless devices], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 6 (208), pp. 15-24.
18. Sinyukin A.S., Konoplev B.G. Integrated CMOS Microwave Power Converter for Passive Wireless Devices, *Russian Microelectronics*, 2021, Vol. 50, No. 3, pp. 189-196.

19. Shokrani M.R., Khoddam M., Hamidon M.N.B., Kamsani N.A., Rokhani F.Z., Shafie S.B. An RF Energy Harvester System Using UHF Micropower CMOS Rectifier Based on a Diode Connected CMOS Transistor, *The Scientific World Journal*, 2014, Vol. 2014, Article 963709, 11 p.
20. Enz C.C., Krummenacher F., Vittoz E.A. An Analytical MOS Transistor Model Valid in All Regions of Operation and Dedicated to Low-Voltage and Low-Current Applications, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 1995, No. 8, pp. 83-114.
21. Enz C.C., Vittoz E.A. Modeling for Low-Voltage and Low-Power Analog IC Design, *Microelectronic Engineering*, 1997, Vol. 39, pp. 59-76.
22. Enz C.C., Vittoz E.A. Charge-based MOS Transistor Modeling. The EKV model for low-power and RF IC design. London: John Wiley & Sons Ltd., 2006, 303 p.
23. Roy K., Mukhopadhyay S., Mahmoodi-Meimand H. Leakage Current Mechanisms and Leakage Reduction Techniques in Deep-Submicrometer CMOS Circuits, *Proceedings of the IEEE*, 2003, Vol. 91, No. 2, pp. 305-327.
24. Hu C., Niknejad A.M., Chauhan S.Y. BSIM4v4.8.2 MOSFET Model – User’s Manual. USA, CA, Berkeley: University of California, 2020, 176 p.
25. Sicard E., Bendhia S.D. Basics of CMOS Cell Design. USA: McGraw-Hill, 2007, 429 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.Е. Лысенко.

**Коноплев Борис Георгиевич** – Южный федеральный университет; e-mail: kbg@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; д.т.н.; профессор; научный руководитель Института нанотехнологий, электроники и приборостроения.

**Konoplev Boris Georgievich** – Southern Federal University; e-mail: kbg@sfedu.ru; Taganrog, Russia; dr. of eng. sc.; professor; scientific advisor, Institute of nanotechnologies, electronics, and equipment engineering.

УДК 621.373

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-183-191

**А.Н. Зикий, А.С. Кочубей**

### **ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ**

*Генераторы, стабилизированные диэлектрическими резонаторами, нашли широкое применение в связи, радиолокации, радионавигации и радиоэлектронной борьбе. Их исследованию посвящено большое число работ, однако повышение требований к ним заставляет разработчиков радиоаппаратуры искать новые технические решения. Особенно важна стабильность частоты генераторов СВЧ в условиях воздействия вибраций, ударов, перепадов температуры, изменения напряжения питания. Влияние внешних воздействующих факторов приводит к появлению паразитных параметров сигнала – уходам частоты, расширению спектральной линии, возрастанию гармоник и субгармоник. Целью данной работы является измерение паразитных параметров выходного сигнала. Объектом исследования является серийный генератор СВЧ. В работе даётся краткое его описание. К генератору предъявляются следующие требования: – расчёт диэлектрического резонатора; – моделирование микрополоскового фильтра из состава умножителя частоты; – рабочая частота  $17490 \pm 3,5$  МГц; – выходная мощность не менее 10 дБм; – сопротивление нагрузки 50 Ом; напряжение питания 15 В; ток потребления не более 215 мА. В качестве результатов исследования представлены: – выбег частоты за 15 минут после включения; – зависимость частоты от напряжения питания; – спектр выходного сигнала в полосе 100 кГц; – спектр выходного сигнала в полосе 20 ГГц. Полученные результаты могут быть использованы студентами и преподавателями радиотехнических дисциплин, инженерами – разработчиками радиоаппаратуры. Статья дополняет известные результаты по экспериментальному исследованию генераторов в части паразитных параметров выходного сигнала. Для начинающих исследователей может быть полезна методика эксперимента.*

*Генератор; стабилизированный диэлектрическим резонатором; схема; конструкция; эксперимент; выбег частоты; зависимость частоты от напряжения питания; спектр; гармоники; субгармоники.*