

УДК 621.396.41

А.В. Дроздов, Д.С. Данилов, И.В. Юнусов, Г.Г. Гошин

## Моделирование диодов с барьером Шоттки для применения в монолитных интегральных схемах СВЧ

Представлена широкополосная модель диода, разработанная на основе диодов с барьером Шоттки, выполненных по технологии монолитных интегральных схем на подложке из арсенида галлия (GaAs), для применения в диапазоне частот до 67 ГГц. Приведены результаты измерений, необходимые для восстановления мало-сигнальной модели диода, и экстракция нелинейных параметров SPICE-модели диода, а именно: вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики, S-параметры при нулевом смещении на диоде. Для исключения паразитных параметров контактных площадок экспериментальные данные были обработаны методом L2L. Особенностью представленной модели является сочетание двух методов моделирования диода: электромагнитная модель для пассивных элементов диода и нелинейная SPICE-модель для моделирования перехода полупроводник–металл. Комбинирование методов моделирования позволяет более полно описать частотные зависимости паразитных элементов топологии диода. Приведены результаты применения модели диода при проектировании умножителя частоты диапазона 20–50 ГГц.

**Ключевые слова:** малосигнальная модель, умножитель частоты, МИС, диод Шоттки.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-28-31

Применение диодов в качестве преобразовательных элементов обусловлено рядом преимуществ, таких как более высокая граничная частота и более низкий уровень собственных шумов. Благодаря приведенным выше преимуществам диодов умножители частоты миллиметровых длин волн в основном строят на основе пассивных схем с использованием в качестве нелинейных элементов диодов с барьером Шоттки [1].

Основной проблемой при моделировании подобных схем является наличие у диодов паразитных параметров, поэтому вычисления параметров диодов на постоянном токе и паразитных элементов на высоких частотах очень важны для достижения целей проектирования.

Целью данной работы было создание модели диода для применения в САПР, которая позволяет увеличить точность расчетов топологий монолитных интегральных схем (МИС). Модель разрабатывалась на основе диодов с барьером Шоттки производства АО «НПФ «Микран». Диоды изготовлены на основе полупроводниковой структуры, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующей подложке из арсенида галлия. Разработанная модель диода, используемая при проектировании (рис. 1), состоит из паразитных элементов, рассчитываемых методом электромагнитного (ЭМ) моделирования, и нелинейного элемента VD1, представленного SPICE-моделью диода [2].

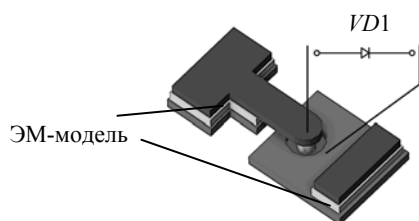


Рис. 1. Модель диода

Как правило, при разработке СВЧ-устройств диод может быть представлен в виде комбинации сопротивлений и емкостей, номиналы которых зависят от напряжения смещения [1]. Представленная модель диода Шоттки состоит из линейных и нелинейных частей. Нелинейная часть соответствует переходу металл–полупроводник, а линейная – подводящим линиям к переходу металл–полупроводник.

### Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперные характеристики диодов Шоттки описываются формулой, содержащей четыре физических параметра: последовательное сопротивление  $R_s$ , шунтирующее сопротивление  $R_j$ , ток насыщения диода  $I_s$ , показатель идеальности  $\eta$ .

ВАХ диода Шоттки обычно описывают эмпирической формулой (1) [3]:

$$I_d(V_d) = I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V_d - I_d R_s)}{\eta k T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где  $I_s$  – ток насыщения,  $V_d$  – напряжение, приложенное к диоду,  $\eta$  – показатель идеальности и  $R_s$  – последовательное сопротивление диода.

Измерения на постоянном токе позволяют получить основные параметры модели диода. С помощью измерений ВАХ определяется паразитное сопротивление диодов Шоттки, а также ряд параметров SPICE-модели диода, таких как ток насыщения ( $I_s$ ), коэффициент эмиссии ( $N$ ), коэффициент плавности  $p$ - $n$ -перехода ( $M$ ) и контактная разность потенциалов ( $V_f$ ) [4]. Экспериментальная и рассчитанная ВАХ диода показаны на рис. 2. Расчет ВАХ диода проводился с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) ADS разработки компании Keysight.

Как видно из рисунка, экспериментальные данные совпадают с результатами моделирования на постоянном токе.

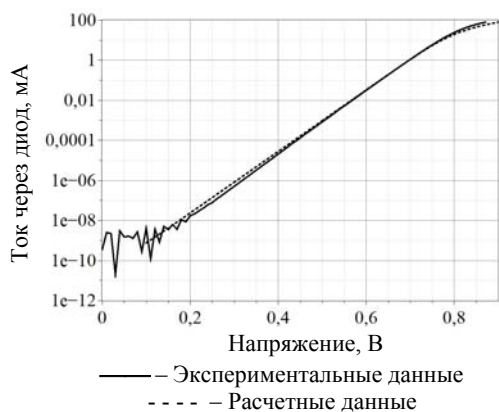


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диода Шоттки

**Вольт-фарадные характеристики**

Общая емкость диодов Шоттки – это ключевой фактор при проектировании высокочастотных смесителей, детекторов и умножителей частоты. Выражение зависимости емкости диода от напряжения смещения приведено ниже (2) [5]:

$$C_j(V) = \frac{dQ}{dV} = \frac{C_{j0}}{(1 - \frac{V_j}{\phi_{bi}})^\gamma}, \tag{2}$$

где  $C_{j0}$  – барьерная емкость при нулевом смещении;  $\phi_{bi}$  – химический потенциал;  $V_j$  – контактная разность потенциалов ( $V_j > 0$ );  $\gamma$  – профиль концентрации легирующей примеси.

Общая емкость диода Шоттки может быть разделена на барьерную емкость и паразитную емкость. Используя формулу (2), полная емкость может быть выражена, как (3) [6]:

$$C_{total} = C_j + C_{pp}, \tag{3}$$

где  $C_{total}$  – общая емкость диода,  $C_{pp}$  – емкость паразитных элементов.

Существует два способа определения емкости диода: это измерение на низкой частоте с использованием LCR-измерителя и вычисления емкости из S-параметров [7]. В данной работе основным методом являлся метод измерения емкости на низкой частоте с последующей верификацией результатов путем сравнения S-параметров модели диода с экспериментальными данными. Низкочастотные измерения были проведены с использованием прибора Agilent E4980A LCR на частоте 10 МГц. Результаты представлены на рис. 3.

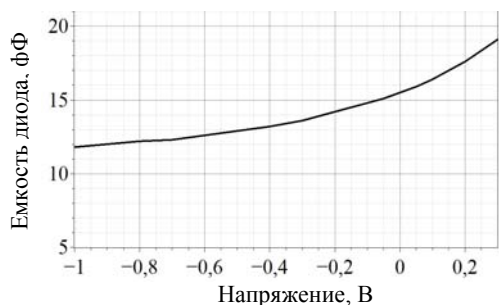


Рис. 3. Изменение емкости диода от напряжения смещения

Измерения были выполнены на тестовой структуре диода. Калибровка проводилась путем измерения тестовой структуры, не имеющей перехода металл–полупроводник, что позволяло исключить из измерений емкость контактных площадок [8].

**Модель диода**

Полученные параметры SPICE-модели диода приведены в таблице.

**Параметры SPICE модели диода**

Параметр	Описание	Ед. изм.	Значение
$I_s$	Ток насыщения	фА	13,5
$R_s$	Последовательное сопротивление	Ом	3,2
$N$	Коэффициент эмиссии		1,55
$C_{j0}$	Барьерная емкость при нулевом смещении	фФ	16
$V_j$	Контактная разность потенциалов	В	0,26
$M$	Коэффициент плавности $p-n$ -перехода		0,5
$B_v$	Обратное напряжение пробоя	В	10
$IB_v$	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению $B_v$	пА	10

При расчетах в САПР SPICE-модель диода использовалась совместно с ЭМ моделью его паразитных параметров. Для исключения паразитных параметров контактных площадок экспериментальные измерения S-параметров диода были обработаны методом исключения параметров цепей L2L [9]. Сравнение экспериментальных данных с расчетными показаны на рис. 4. Измерения проводились на пластине с использованием зондовой станции и векторного анализатора цепей PNA-X компании Keysight в диапазоне до 67 ГГц.

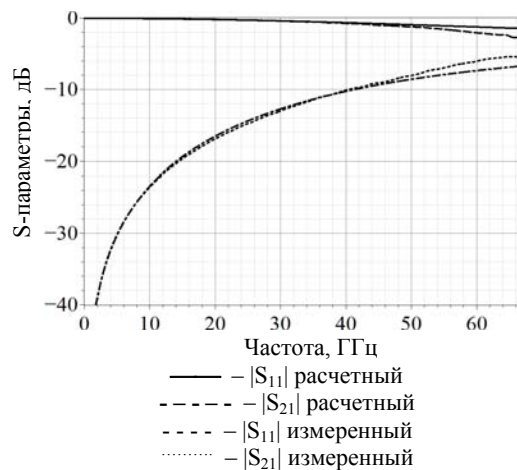


Рис. 4. S-параметры диода Шоттки

**Применение модели диода**

На основе полученной модели диода был разработан ряд топологий МИС преобразователей частоты. Наиболее высокочастотным устройством является удвоитель частоты с диапазоном по выходу 20–50 ГГц [10]. Моделирование МИС проводилось в САПР ADS с использованием метода гармонического баланса.

Микрофотография произведенной МИС показана на рис. 5. МИС содержит два симметрирующих

трансформатора и нескольких диодов Шоттки. Измерения МИС проводились на пластине с использованием зондовой станции CASCADE компании Microtech, генератора Г7М компании АО «НПФ «Микран» и анализатора спектра PSA компании Keysight.

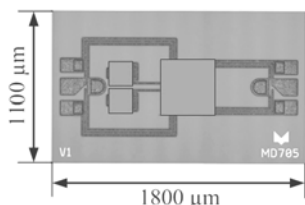


Рис. 5. Микрофотография МИС умножителя частоты MD705

Результаты измерения коэффициента преобразования и его сравнение с результатами моделирования показаны на рис. 6.

Измерения МИС удвоителя частоты проводились при уровне сигнала на входе, равном 15 дБм.

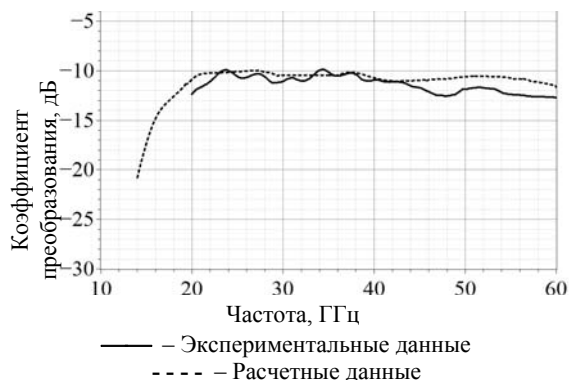


Рис. 6. Коэффициент преобразования удвоителя частоты MD705

Как видно из рис. 4 и 6, результаты моделирования имеют незначительные отклонения от экспериментальных вплоть до частоты 50 ГГц. На более высоких частотах результаты расчетов модели диода МИС удвоителя имеют расхождения с экспериментальными данными. Расхождение результатов расчета и измерений МИС можно объяснить потерями в выходной цепи, не учтенными при моделировании.

#### Заключение

Приведена малосигнальная модель диодов с барьером Шоттки, работающая в широком диапазоне частот до 67 ГГц. Для получения модели был проведен ряд измерений: ВАХ, ВФХ, S-параметры. Для исключения паразитного влияния контактных площадок было проведено математическое исключение подводящих цепей из экспериментальных данных методом L2L. В качестве примера приведены результаты полного ЭМ расчёта МИС удвоителя с диапазоном выходных частот 20–50 ГГц [10], на основании которых можно судить о работоспособности модели диода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по соглашению 14.577.21.0279 от 26.09.2017, идентификатор RFMEFI57715X0279.

#### Литература

1. Maas S.A. Microwave mixers (SecondEd.). – Boston: Artech House, 1993. – 396 p.
2. Tobin P. PSpice for circuit theory and electronic devices. – San Rafael: Morgan&Claypool Publ., 2007. – 174 p.
3. Modeling and application of microwave detector diodes / A.S. Zagorodny, A.V. Drozdov, N.N. Voronin, I.V. Yunusov // 14 International conference and seminar of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – 2013. – P. 96–99.
4. Analytical extraction of a Schottky diode model from broadband S-Parameters / A.Y. Tang, V. Drakinskiy, K. Yhland, J. Stenarson, T. Bryllert, J. Stake // IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2013. – Vol. 61, No. 5. – P. 1870–1878.
5. Дроботун Н.Б. GaAs-монокристаллическая интегральная схема утроителя частоты на основе диодов с барьером Шоттки с входным диапазоном частот 7–17 ГГц / Н.Б. Дроботун, А.В. Дроздов, Д.С. Данилов // Электронные средства и системы управления XIII Междунар. науч.-практ. конф.: матер. докладов. – 2017. – Ч. 2. – С. 229–231.
6. Millimeter-wave diode-grid frequency doubler / C.F. Jou, W.W. Lam, H.Z. Chen, K.S. Stolt, N.C. Luhmann, D.B. Rutledge // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1988. – Vol. 36, No. 11. – P. 1507–1514.
7. Estreich D.B. A Simulation model for Schottky diodes in GaAs integrated circuits // IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems. – 1983. – Vol. 2, No. 2. – P. 106–111.
8. Modeling and characterization of vertical GaN Schottky diodes with AlGaIn cap layers / M.R. Hontz, Y. Cao, M. Chen, R. Li, A. Garrido, R. Chu, R. Khanna // IEEE transactions on electron devices. – 2017. – Vol. 5. – P. 2172–2178.
9. L-2L de-embedding method with double-T-type PAD model for millimeter-wave amplifier design / S. Kawai, K.K. Tokgoz, K. Okada, A. Matsuzawa // IEEE 15th topical meeting on silicon monolithic integrated circuits in RF systems. – 2015. – P. 43–45.
10. Drobotun N. Broadband microwave frequency doublers with improved harmonic suppression based on quasi-vertical GaAs Schottky diodes / N. Drobotun, A. Drozdov // Proceedings of the electronic design innovation conference EDICON 2017. – 2017. – P. 50–54.

#### Дроздов Алексей Викторович

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-952-882-54-97  
Эл. почта: dalvik@micran.ru

#### Данилов Даниил Сергеевич

Инженер департамента ИИС АО «НПФ «Микран» Кирова пр-т, д. 51, г. Томск, Россия, 634041  
Тел.: +7-953-923-68-46  
Эл. почта: danilov.ds@micran.ru

#### Юнусов Игорь Владимирович

Начальник конструкторско-технологического отдела СВЧ МИС НПФ «Микроэлектроника» АО «НПФ «Микран» Кирова пр-т, д. 51, г. Томск, Россия, 634041  
Тел.: +7-952-890-98-01  
Эл. почта: igor.v.yunusov@yandex.ru

**Гошин Геннадий Георгиевич**

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. СВЧКР ТУСУР  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-18  
Эл. почта: goshingg@svch.tusur.ru

Droz dov A.V., Dani lov D.S., Yunusov I.V., Goshin G.G.

**Schottky diode model for MMIC Application**

The article presents a wideband Schottky diode model, the diode was fabricated using Micran GaAs monolithic integrated technology (MMIC) for the application range up to 67 GHz. The measurements results necessary to reconstruct the small-signal model of the diode and extract the nonlinear parameters of the SPICE diode model are given, namely: IV characteristics, CV characteristics, S-parameters with zero bias on the diode. To eliminate the parasitic parameters of the pad, the experimental data was de-embedded by the L2L method. A feature of the presented model is its layout of the diode simulation methods, namely: EM simulation for passive diode elements and a nonlinear SPICE model for the semiconductor area. The combination of simulation methods allows us to better describe the frequency dependences of parasitic elements of the diode topology. The simulated results are presented compared to measured data and used to design frequency multiplier of 20-50 GHz band.

**Keywords:** small-signal model, frequency multiplier, MMIC, Schottky diode.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-28-31

*References*

1. Maas S.A. *Microwave mixers (SecondEd.)*. Boston, Artech House, 1993. 396 p.
2. Tobin P. *PSpice for circuit theory and electronic devices*. San Rafael, Morgan & Claypool Publ., 2007. 174 p.
3. Zagorodny A.S., Drozdov A.V., Voronin N.N., Yunusov I.V. Modeling and application of microwave detector diodes. *14 International conference and seminar of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM)*, 2013, pp. 96–99.
4. Tang A.Y., Drakinskiy V., Yhland K., Stenarson J., Bryllert T., Stake J. Analytical extraction of a Schottky diode model from broadband S-Parameters. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2013, vol. 61, no. 5, pp. 1870–1878.
5. Drobotun N.B., Drozdov A.V., Dani lov D.S. GaAs MMIC of a frequency tripler based on Schottky diodes with an input frequency range from 7 to 17 GHz. *Electronic tools and systems management XIII international scientific-practical conference*, 2017, vol. 2, pp. 229–231.
6. Jou C.F., Lam W.W., Chen H.Z., Stolt K.S., Luhmann N.C., Rutledge D.B. Millimeter-wave diode-grid frequency doubler. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 1988, vol. 36, no. 11, pp. 1507–1514.

7. Estreich D.B. A simulation model for Schottky diodes in GaAs integrated circuits. *IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems*, 1983, vol. 2, no. 2, pp. 106–111.

8. Hontz M.R., Cao Y., Chen M., Li R., Garrido A., Chu R., Khanna R. Modeling and characterization of vertical GaN Schottky diodes with AlGaIn cap layers. *IEEE Transactions on electron devices*, 2017, vol. 5, pp. 2172–2178.

9. Kawai S., Tokgoz K.K., Okada K., Matsuzawa A. L-2L de-embedding method with double-T-type PAD model for millimeter-wave amplifier design. *IEEE 15th topical meeting on silicon monolithic integrated circuits in RF systems*, 2015, pp. 43–45.

10. Drobotun N., Drozdov A. Broadband microwave frequency doublers with improved harmonic suppression based on quasi-vertical GaAs Schottky diodes. *Proceedings of the electronic design innovation conference EDICON, 2017*, 2017, pp. 50–54.

**Aleksey V. Drozdov**

PhD student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenina Av., Tomsk, Russia, 634050  
Phone.: +7-952-882-54-97  
Email: dalvik@micran.ru

**Daniil S. Dani lov**

Engineer, T&M Department, MICRAN, Research and Production Company  
Kirova Ave., 51 d, Tomsk, Russia, 634041  
Phone.: +7-953-923-68-46  
Email: danilov.ds@micran.ru

**Igor V. Yunusov**

Head of Technological Research Group of Microelectronics Department, MICRAN, Research and Production Company  
51 d, Kirova Av., Tomsk, Russia, 634041  
Phone.: +7-952-890-98-01  
Email: igor.v.yunusov@yandex.ru

**Gennadiy G. Goshin**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenina Av., Tomsk, Russia, 634050  
Phone.: +7 (382-2) 70-15-18  
Email: goshingg@svch.tusur.ru