

УДК 621.382

Э.В. Семёнов, Т.Х. Бибииков, Н.Д. Малютин, А.П. Павлов

Моделирование нелинейности преобразования видеоимпульсных сигналов полупроводниковым диодом

Показано, что модель, удовлетворительно отражающая преобразование видеоимпульсного сигнала диодом, дает значительно большую погрешность моделирования в отношении характеристики нелинейности преобразования видеоимпульсных сигналов (как в случае отклонения параметров модели от действительных, так и при соответствии параметров модели параметрам конкретного экземпляра диода). Обсуждаются причины данной погрешности, возможности ее уменьшения и полезного применения.

Ключевые слова: нелинейность, сверхширокополосные сигналы, моделирование, полупроводниковый диод.

Введение

При разработке нелинейных рефлектометров [1] и локаторов [2] оказывается необходимым моделирование нелинейных искажений сверхширокополосных (СШП) сигналов проектируемыми цепями и устройствами. Требования к линейности и динамическому диапазону приемника являются одной из наиболее сложных проблем и при создании СШП-систем связи [3]. Поскольку нелинейные свойства цепей проявляются по-разному при воздействии на них разных сигналов [4], в качестве тестовых следует в перечисленных случаях использовать СШП-сигналы (в том числе видеоимпульсные). Методы и средства для такого моделирования созданы [4–7]. Однако в настоящее время остается открытым вопрос о том, в какой степени источники погрешности моделирования сказываются на результатах расчета нелинейных искажений СШП-сигналов различными цепями.

Ясно, что получить приемлемую погрешность моделирования всей цепи возможно, только если модели отдельных элементов, составляющих цепь, будут адекватными. В дальнейшем рассмотрим модель полупроводникового диода.

Цель данной статьи – рассмотреть влияние различных источников погрешности на точность моделирования характеристики нелинейности преобразования видеоимпульсных сигналов полупроводниковым диодом.

Погрешности моделирования, связанные с отклонением параметров модели диода от действительных

В качестве примера используем диод Шоттки 1N5817 и его SPICE-модель (рис. 1), в которой

$$I_1(u) = IS \left[\exp\left(\frac{q}{NkT}u\right) - 1 \right],$$

$$C_1(u) = CJ_0 \left(1 - \frac{u}{VJ}\right)^{-M} + TT \cdot IS \frac{q}{NkT} \exp\left(\frac{q}{NkT}u\right). \quad (1)$$

Здесь IS – ток насыщения; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; N – коэффициент инжекции; VJ – контактная разность потенциалов; CJ_0 – барьерная емкость при нулевом смещении, M – коэффициент лавинного умножения; TT – время переноса заряда. Значения этих параметров, приведенные для модели данного диода в системе автоматизированного проектирования (САПР) Micro-Cap 7.0 указаны во второй строке табл. 1. Примем $RS = 0$ (см. рис. 1), так как падение напряжения на этом сопротивлении при получающихся в данной работе токах через диод не превышает 0,3 мВ.

На рис. 2, а представлен ток через диод $i(t)$ при температуре 26,1 °С и воздействии на него видеоимпульсом напряжения $u(t)$ амплитудой 137 мВ и длительностью 16 нс на уровне 0,5 его амплитуды (кривая 5). В этом случае диод почти закрыт, а токи через него обусловлены его емкостью. Такая ситуация имеет место, в частности, при использовании диодов в качестве защитных элементов. Кривые получены с использованием прибора Р4-И-01 [6] (эксперимент, кривая 1) и САПР AWR Design Environment (AWRDE) (модель

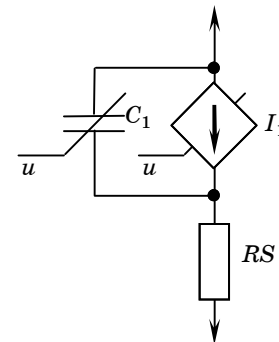


Рис. 1. Используемая модель диода

лирование, кривая 2). Видно, что результаты моделирования и эксперимента достаточно хорошо совпадают.

Параметры нелинейной модели диода Шотки 1N5817

Источник значений параметров	I_S , мкА	N	$CJ0$, пФ	VJ , В	M	TT , нс
Micro-Cap	6,34578	1,09485	222,598	11,7402	1,36685	0
ВАХ и ВФХ при 100 кГц	4,5	1,7	202	0,25	0,35	13
Оптимизация по отклику на видеоимпульс	4,5	1,7	202	0,25	0,24	0

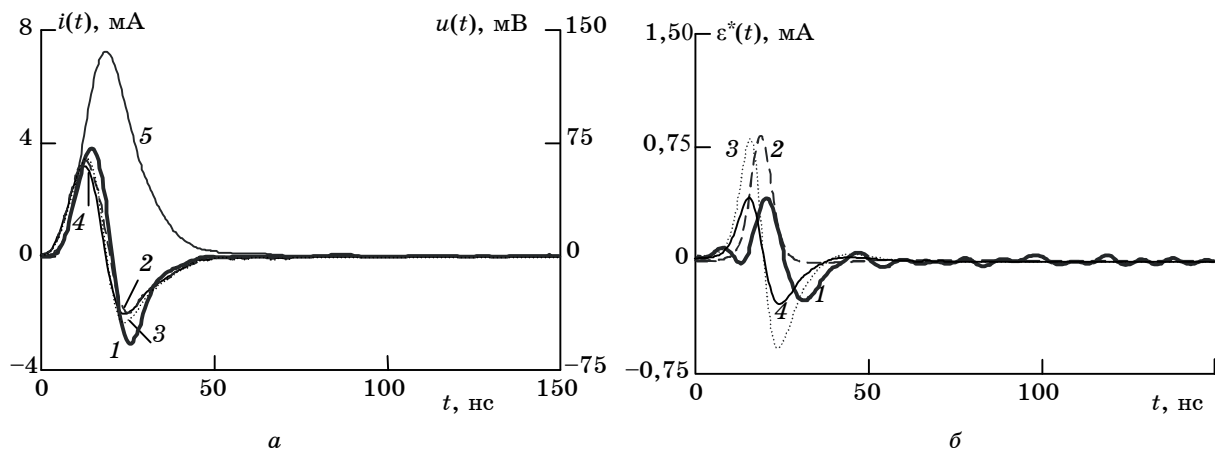


Рис. 2. Токи через диод 1N5817 (а) и характеристики нелинейности этих токов (б).

Кривые 1 – результаты эксперимента, кривые 2–4 – результаты моделирования для параметров модели, приведенных во второй–четвертой строках таблицы соответственно, кривая 5 – напряжение на диоде

В указанном режиме диод вносит искажения сигналов, обусловленные нелинейностью его емкости. На рис. 2, б представлены экспериментальная (кривая 1) и расчетная (кривая 2) и характеристики нелинейности $\varepsilon^*(t)$ тока через диод 1N5817, определенные для такой же, как на рис. 2, а, формы воздействующего на диод напряжения. Характеристики определены в соответствии со способом [5] по формуле

$$\varepsilon^*(t) = i(t) - F^{-1} \left[\frac{F[i_2(t)]}{F[u_2(t)]} \right] * u(t),$$

где $u_2(t)$ – напряжение дополнительного тестового сигнала, формируемого в рамках способа [5]; $i_2(t)$ – ток через диод, соответствующий этому напряжению; F и F^{-1} – прямое и обратное преобразование Фурье соответственно. Характеристики получены измерителем Р4-И-01 (эксперимент) и виртуальным измерительным прибором, разработанным нами для САПР AWRDE [7] (моделирование). В отличие от случая сопоставления токов через диод (экспериментального и модельного) наблюдается качественное различие результатов моделирования и эксперимента. Это отражается в том, что амплитуды упомянутых характеристик нелинейности отличаются в два раза и качественно различаются их формы.

Одной из причин указанных различий является отклонение параметров модели диода от действительных параметров конкретного экземпляра диода. В частности, величина контактной разности потенциалов $VJ = 11,7402$ В, приведенная для рассматриваемого диода Шотки в САПР Micro-Cap, даже из общих соображений представляется определенной неправильно. На рис. 3 представлены вольт-амперные (ВАХ) (а) и вольт-фарадные (ВФХ) (б) характеристики выбранного экземпляра диода (кривые 1), измеренные с помощью прибора Е7-20 при частоте тестового сигнала 100 кГц. Кривые 2 получены по результатам моделирования при параметрах, приведенных для модели диода в САПР Micro-Cap. На основании этих измерений определены уточненные параметры модели диода (третья строка таблицы). Отличия этих параметров от приведенных в Micro-Cap весьма существенны.

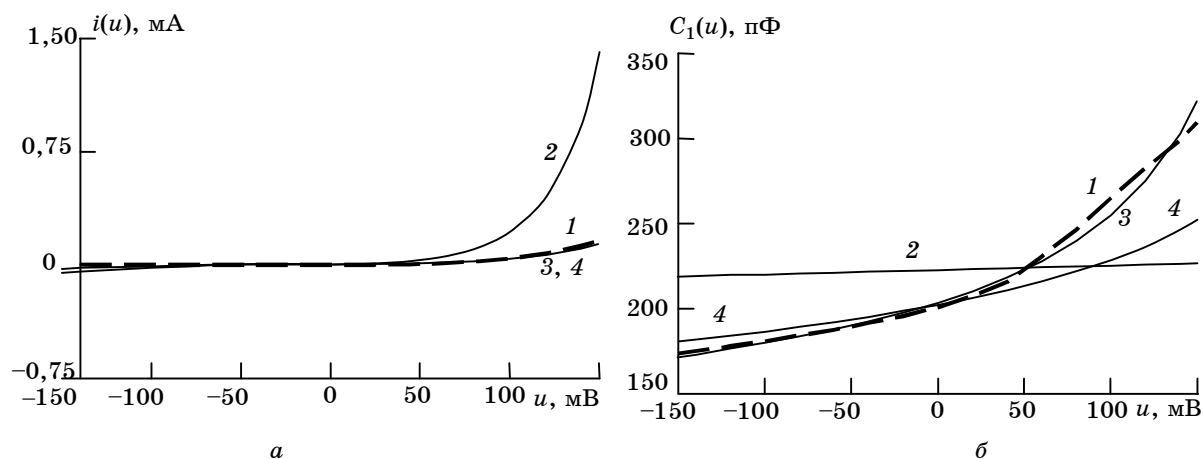


Рис. 3. Вольт-амперные (а) и вольт-фарадные (б) характеристики диода. Кривые 1 – измеренные, кривые 2, 3, 4 – результаты моделирования для параметров модели, приведенных во второй–четвертой строках таблицы соответственно

Погрешности моделирования, связанные с неадекватным представлением диффузионной емкости

Теперь выполним моделирование тока через диод (см. рис. 2, а, кривая 3) и характеристики нелинейности (см. рис. 2, б, кривая 3) для уточненных параметров модели. По-прежнему видны существенные отличия характеристики нелинейности от экспериментальной. Поскольку в данном случае устранена, насколько возможно, погрешность моделирования, связанная с отклонением параметров модели от действительных параметров диода, следует искать другую причину оставшейся погрешности.

Для этого методами математического программирования установим параметры модели такими (см. таблицу – четвертая строка), чтобы минимизировать различия характеристики нелинейности, полученной экспериментально и по результатам моделирования (см. рис. 2, б, кривая 4). Вычисленные по этим параметрам ВАХ и ВФХ приведены на рис. 3, кривые 4. Основное отличие данных параметров от полученных по результатам измерений на E7-20 (непрерывным сигналом частотой 100 кГц) состоит в значении параметра $T\tau$, определяющего величину диффузионной емкости (второе слагаемое в правой части формулы (1)). Известная зависимость ВФХ от частоты сигнала [8] применительно к видеоимпульсному воздействию означает, что ВФХ, полученная при воздействии на диод низкочастотным сигналом, будет адекватной только для длительностей импульса, существенно больших времени переноса заряда. Это является другим источником погрешности моделирования нелинейности преобразования видеоимпульсных сигналов диодом. Причем из проведенных исследований видно, что погрешность эта наблюдается главным образом в отношении моделирования нелинейности преобразования сигналов. Модель тока через диод в данном режиме достаточно хорошо совпадает с экспериментом, несмотря на сопоставимость длительности тестового сигнала (16 нс) со временем переноса заряда (13 нс).

Заключение

Отклонение параметров модели диода от действительных в значительно большей степени сказывается на погрешности моделирования характеристики нелинейности преобразования сигналов, чем на погрешности моделирования токов через диод. Поэтому такая характеристика может служить дополнительным критерием правильности определения параметров диода.

Другим источником погрешности является то, что ВФХ, полученная при воздействии на диод низкочастотным сигналом, адекватна только для длительностей импульса, существенно больших времени переноса заряда. Этот вид погрешности может быть существенно уменьшен для заданного сигнала путем подбора параметров модели, определяющих ВФХ, таким образом, чтобы минимизировать различия характеристики нелинейности, полученной экспериментально и по результатам моделирования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-99041), Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственные контракты № П453 и № П2175).

Литература

1. Семёнов Э.В. Нелинейная рефлектометрия с применением видеоимпульсных тестовых сигналов // Известия Том. политех. ун-та. – 2006. – Т. 307, № 3. – С. 153–155.
2. Вернигоров Н.С. К вопросу о применении многочастотного сигнала в нелинейной локации / Н.С. Вернигоров, А.Р. Борисов, В.Б. Харин // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 1. – С. 63–66.
3. Green E.R. System Architectures for High-rate Ultra-wideband Communication Systems: A Review of Recent Developments / E.R. Green, S. Roy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.intel.com/technology/comms/uwb/download/w241_paper.pdf, свободный (дата обращения: 31.08.2010).
4. Семёнов Э.В. Исследование нелинейности преобразования детерминированных сверхширокополосных сигналов путем линейного комбинирования откликов объекта на линейно зависимые тестовые сигналы // Известия Том. политех. ун-та. – 2004. – Т. 307, № 4. – С. 18–21.
5. Семёнов Э.В. Использование разности сверток тестовых сигналов и откликов объекта для исследования нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов / Э.В. Семёнов, А.В. Семёнов // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 4. – С. 480–485.
6. Векторный импульсный измеритель характеристик цепей и проводных систем / А.А. Бомбизов, А.А. Ладур, А.Г. Лоцилов и др. // Приборы. – 2007. – № 9. – С. 28–31.
7. Semyonov E.V. Virtual nonlinear impulse network analyzer for Microwave Office / E.V. Semyonov, N.D. Maljutin, A.G. Loschilov // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo '2009): Proc. of 19th Int. Crimean Conference. Sevastopol, Ukraine, 14–18 September 2009. – Sevastopol: Veber, 2009. – Vol. 1. – P. 103–105.
8. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: учеб. пособие. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. – 392 с.

Семёнов Эдуард Валерьевич

Канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-33-65
Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Бибиков Тимур Хамитович

Мл. науч. сотрудник СКБ «Смена» ТУСУРа
Тел.: (382-2) 25-33-60
Эл. почта: bibikov.timur@gmail.com

Малютин Николай Дмитриевич

Д-р техн. наук, проф., зам. проректора по научной работе ТУСУРа
Тел.: (382-2) 52-79-42
Эл. почта: ndm@main.tusur.ru

Павлов Артем Павлович

Мл. науч. сотрудник СКБ «Смена» ТУСУРа
Тел.: (382-2) 25-33-60
Эл. почта: ArtemP@sibtronika.ru

Semyonov E.V., Bibikov T.H., Maljutin N.D., Pavlov A.P.

Nonlinearity modeling of the baseband signal transformation by semiconductor diode

It is shown that the model, which well represents the baseband signal transformation by a diode, leads to considerably larger error while modeling the nonlinearity characteristic of the transformation of baseband signals (both at a deviation of model parameters from true and if model parameters correspond to parameters of the chosen example of a diode). The reasons of the given error, the possibility of its decrease and useful application are discussed.

Keywords: nonlinearity, ultrawideband signals, modeling, semiconductor diode.