

АППРОКСИМАЦИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В РЕЖИМЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКА

В работе рассмотрены вопросы использования методик аппроксимации вольт-амперных характеристик для идентификации нелинейных рассеивателей. Предложено использовать ряды Вольтерра и аппроксимацию многочленов для точной описания физических процессов в электронных приборах нелинейной радиолокации.

Ключевые слова: вольт-амперных характеристик, ряды Вольтерра, структуры «металл-окисел-металл», нелинейные продукты сигнала отклика, нелинейного рассеивателя.

VO DUY PHUC, Y.F. ZINKOVSKIY

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

APPROXIMATION OF VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTICS IN THE REGIME OF SEMICONDUCTOR IRRADIATION

In the field of technical protection of information, the Non Linear Radar (NR) is widely used to search for the electronic devices. Detection of nonlinear objects by using NR in the most cases is accomplished by receiving and analyzing the levels of multiple harmonics of the response signal (the second and third) under the conditions of multiple harmonic sounding. The separation of objects into electronic and noise is determined by the analysis of the ratio of the levels of the receiving harmonics. The purpose of the article is solving the problem of approximation voltage-current characteristics of the nonlinear elements.

The possibility of usage of dynamic Volterra series for nonlinear scatterers analysis at the polyharmonic impact on the response signal spectrum is shown. The method of implicit accounting of current-voltage characteristics "feeble" nonlinearity of semiconductor element, that allows to make an adequate calculation of minimum levels of the response signal spectral components for the estimation of dynamic range of nonlinear scatterer is justified.

The method of approximation provides the most accurate analytical expression, which is the description of the physical process in the semiconductor elements when using the radar for searching the mortgage devices. By using this method, can be minimizing the effect of availability, metal-oxide-metal structures are possible as a non-motivated "mortgage device" in the process of its search.

Keywords: current-voltage characteristics, Volterra series, structure "metal-oxide-metal", non-linear products of response signal, non linear scattering.

Вступление

В сфере технической защиты информации нелинейная радиолокация (НР) имеет прикладное применение для поиска закладных радиоэлектронных устройств (РЭУ). Выявляемые с ее помощью объекты имеют в своем составе радиоэлементы с нелинейными характеристиками (микросхемы, транзисторы, диоды и др.). Использование НР при поиске радиоэлектронных устройств основано на рассеивании объектом поиска нелинейных продуктов (НП) сигнала отклика (СО) – кратных гармоник или комбинационных частот зондирующего сигнала (ЗС).

По уровням принятых в процессе зондирования гармоник сигнала отклика (например, второй и третьей гармоник) оператор выявляет и идентифицирует объект поиска [1-2].

Исследование уровня гармоник сигнала отклика требует использования методов аппроксимация вольт-амперных характеристика полупроводника.

Постановка задачи

В сфере технической защиты информации актуальной остается задача нахождения источников электромагнитного излучения. Особого внимания заслуживают нелинейные рассеиватели, способные переизлучать в окружающее пространство новые спектральные составляющие. Исследование природы рассеивателя по спектру сигнала отклика в ряде случаев требует особых алгоритмов, причем адаптируемых под параметры воздействующего сигнала [4, 5].

Во время зондирования закладного устройства (ЗУ) наблюдаются обратимые деформации ВАХ полупроводникового диода [6], что отражается на энергетике переотраженных нелинейных продуктов.

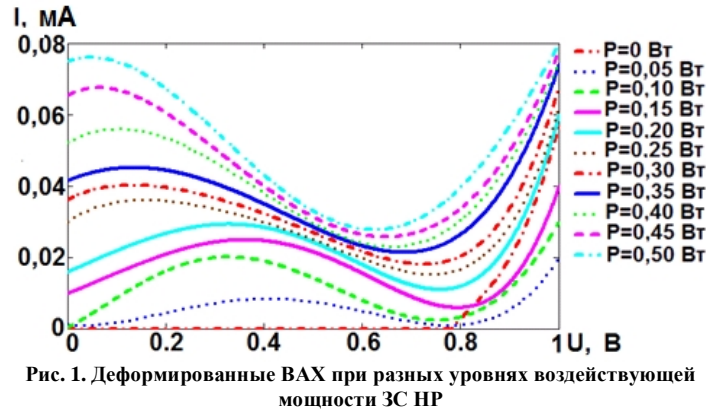
Деформация ВАХ полупроводникового диода во время зондирования связана в первую очередь с диссипацией энергии ЗС, приводящей к эффекту разогрева свободных носителей заряда в СВЧ поле [7].

На рис. 1 представлено семейство деформированных ВАХ диода типа 2А604А в составе широкополосного имитатора ЗУ [6]. В эксперименте использовался НР типа «NR-μ» [5, 6], имитатор был размещен на расстоянии 0,5 м от излучателя, регистрации ВАХ с выводов СВЧ диода выполнялась с помощью измерительного комплекса МВУ8 [4]. При действующей мощности в диапазоне 50–500 мВт на ВАХ появляется область с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Необходимость аппроксимации ВАХ полупроводника обусловлена невозможностью достаточно точно аналитического описания физических процессов в электронных приборах. В данной работе рассмотрены аппроксимации ВАХ с помощью рядов Вольтерра и степенным многочленом.

Основная часть

В качестве модели элементарного нелинейного рассеивателя рассматривается симметричный вибратор, в котором находится полупроводниковый диод. известной эквивалентной антенной структуры и амперной характеристик диода, можно получить математические выражения нахождения амплитудного гармонических и комбинационных



нагрузке
Для
схемы
вольт-
(ВАХ)
для
спектра

составляющих тока, проходящего через полупроводниковый прибор. Особые сложности возникают, когда на рассеиватель воздействуют четыре и более независимых сигналов с разными частотами. В этом случае нелинейный процесс представляет смешивание этих сигналов с последующим образованием широкого спектра сигнала отклика, состоящего из комбинационных и гармонических компонент типа:

$$I(Kw_1 \pm Lw_2 \pm Mw_3 \pm Nw_4) = i_{\Sigma \text{диода}},$$

где $\omega_1 - \omega_4$ – частоты воздействующих сигналов; K, L, M, N – коэффициенты, принимающие значение из ряда целых чисел 0, 1, 2, 3, ...

При этом, рациональным оказывается анализ на основе метода динамических рядов Вольтерра [3].

При расчете амплитуд спектральных составляющих в процессе гармонического или полигармонического возбуждения необходим точный подбор аппроксимирующей функции нелинейных участков ВАХ диода, соответствующих воздействию токам. Для разрешения задачи аппроксимации как правило используется метод, основанный на применении тригонометрических функций кратных аргументов.

Получение приближенного выражения n -го порядка для ВАХ диода предусматривает выбор n -го количества точек на соответствующей характеристике с последующим формированием системы из n уравнений вида:

$$I_0 = a_1 U_{\text{вход}} + a_2 U_{\text{вход}}^2 + a_3 U_{\text{вход}}^3 + \dots + a_{n-1} U_{\text{вход}}^{n-1} + a_n U_{\text{вход}}^n, \tag{1}$$

где a_1, \dots, a_n – коэффициенты аппроксимации.

Число членов степенного многочлена определяется требуемой точностью. В случае моногармонического воздействия на нелинейный рассеиватель, которое характеризуется выражением $U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + j)$, где U_0 – постоянное напряжение смещения, уравнение преобразованного тока имеет вид:

$$I(t) = a_1 (U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + j)) + a_2 (U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + j))^2 + \dots + a_n (U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + j))^n.$$

Отметим, что полигармоническое воздействие с частотами ω_p характеризуется функцией $u_p(t)$, представленной в виде ряда Фурье:

$$u_p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} U_p^{&k} \exp(jk\omega_p t),$$

где $U_p^{&k}$ – коэффициенты разложения.

Рассмотрим влияние на нелинейный рассеиватель бигармонического сигнала, причем одна его составляющая по частоте намного больше другой ($\omega_1 \gg \omega_2$). В этом случае ток и напряжение через полупроводниковый элемент будут найдены с учетом всех комбинационных частот:

$$U(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} U_k \exp[j(\omega_1 + h\omega_2)t],$$

$$I(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} I_k \exp[j(\omega_1 + h\omega_2)t].$$

где $h=0,1,2,\dots$

При более сложном полигармоническом воздействии рациональным является использование метода динамических рядов Вольтерра в исследовании нелинейно преобразованных токов. В соответствии с указанным методом производится анализ системы, использующий линейную аппроксимацию для нахождения подсистем, описываемых уравнениями первого порядка. Далее находятся подсистемы второго порядка, учитывающие «слабые» нелинейности как дополнительные источники тока. Значения комплексных амплитуд источников могут быть выражены через значения токов и напряжений, которые

были найдены при расчете подсистемы первого порядка. Эта процедура продолжается до тех пор, пока не будет найден требуемый порядок [1].

Так, с учетом указанного подхода и точной аппроксимации функций для ВАХ полупроводникового элемента, при действии бигармонического сигнала в виде $U_{\text{вход}} = U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t$ возможным становится нахождение амплитудных составляющих в выражениях:

$$U(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} U_l U_k \exp \left[j(\omega_1 + h\omega_p)(\omega_2 + l\omega_p)t \right],$$

$$I(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_l I_k \exp \left[j(\omega_1 + h\omega_p)(\omega_2 + l\omega_p)t \right].$$

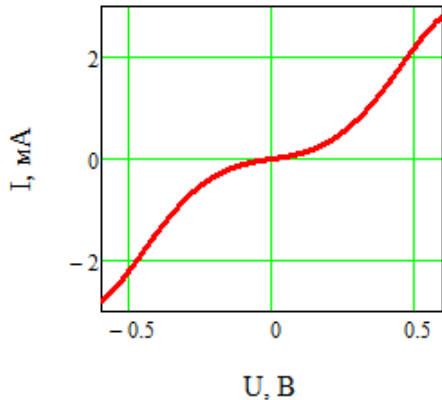


Рис. 2. ВАХ контакта с окислом между стальными изделиями

рассеивателя. В случае, когда внутренних источников ЭДС нет, НРС рассматриваются как «пассивные».

При моногармоническом воздействии (со смещением) U_0 на активный НРС зондирующим сигналом на нелинейном элементе возникнет напряжение

$$U(t) = U_0 + U_m \cdot \cos(\omega_0 t + j), \quad (2)$$

режим реальных НР характеризуются $U_0=0,2$ В, $U_m=0,3$ В, $\omega_0 = 2\pi f_{3C}$, $f_{3C} = 848$ МГц, $j = 0$. Подставив (2) в (1) получим аппроксимирующие функции уровней спектральных компонент на второй и третьей гармониках:

$$I_2^A(2\omega_0) = a_2 0,5U_m^2 + a_3 \cdot 1,5U_0 U_m + a_4(3U_0^2 U_m^2 + 0,5U_m^4) + a_5 \cdot 5(U_0^3 U_m^2 + 0,5U_0 U_m^4),$$

$$I_3^A(3\omega_0) = a_3 0,25U_m^3 + a_4 U_0 U_m^3 + a_5(2,5U_0^2 U_m^3 + 0,312U_m^5), \quad (3)$$

где a_2, \dots, a_5 соответствуют коэффициентам аппроксимации в (1) для полупроводникового прибора.

При моногармоническом воздействии на пассивный НРС на нелинейном элементе возникнет напряжение

$$U(t) = U_m \cdot \cos(\omega_0 t + j), \quad (4)$$

при тех же условиях путем подстановки (4) в (1) получим функции уровней спектральных компонент на второй и третьей гармониках:

$$I_2^H(2\omega_0) = b_2 0,5U_m^2 + b_4 0,5U_m^4,$$

$$I_3^H(3\omega_0) = b_3 0,25U_m^3 + b_5 0,312U_m^5, \quad (5)$$

где b_2, \dots, b_5 соответствуют коэффициентам аппроксимации для полупроводниковых приборов и для МОМ-структур.

При бигармоническом колебания, представляющего собой сумму двух гармоник или полигармоническая колебаний представляет собой сумму нескольких гармоник:

$$U = U_1 \cdot \cos(\omega_1 t + j_1) + U_2 \cdot \cos(\omega_2 t + j_2),$$

где $\omega_1 = 460$ МГц; $\omega_2 = 840$ МГц; с помощью аппроксимации многочленов получим выражение для составляющих тока:

$$i(\omega_1) = a_1 U_1 + \left(\frac{3}{4} U_2^2 + \frac{3}{2} U_1 U_2^2 \right) a_3 + a_5 \left(\frac{5}{8} U_1^5 + \frac{15}{4} U_1^3 U_2^2 + \frac{15}{8} U_1 U_2^4 \right);$$

$$i(\omega_2) = a_1 U_2 + \left(\frac{3}{4} U_1^2 + \frac{3}{2} U_2 U_1^2 \right) a_3 + a_5 \left(\frac{5}{8} U_2^5 + \frac{15}{4} U_2^3 U_1^2 + \frac{15}{8} U_2 U_1^4 \right);$$

$$i(2w_1) = \frac{1}{2}a_2U_1^2 + \frac{1}{2}a_4U_1^4 + \frac{3}{2}a_4U_1^2U_2^2;$$

$$i(2w_2) = \frac{1}{2}a_2U_2^2 + \frac{1}{2}a_4U_2^4 + \frac{3}{2}a_4U_1^2U_2^2;$$

$$i(w_1 \pm w_2) = a_2U_1U_2 + 1,5a_4(U_2U_1^3 + U_1U_2^3);$$

$$i(2(w_1 \pm w_2)) = 0,75a_4U_1^2U_2^2;$$

$$i(2w_1 \pm w_2) = 0,75a_3U_1^2U_2 + 1,25a_5U_1^4U_2 + 1,875a_3U_1^3U_2^2;$$

$$i(w_1 \pm 2w_2) = 0,75a_3U_2^2U_1 + 1,25a_5U_2^4U_1 + 1,875a_3U_2^3U_1^2;$$

Рассчитанные по (3) и (5) уровни второй и третьей гармоник вторичного сигнала для рассмотренных ВАХ полупроводникового прибора в активном и пассивном режимах и МОМ-структуры в пассивном режиме приведены на рисунке 3. Источниками «ложных тревог» в зоне облучения для нелинейной радиолокации являются контакты металлов с промежуточным окисным слоем (структуры «металл-окисел-металл» или МОМ-структуры), способные также рассеивать преобразованный спектр ЗС. В некоторых случаях (при относительно большой мощности излучения) нежелательный эффект могут дать паяные или сварные соединения металлов [8, 9].

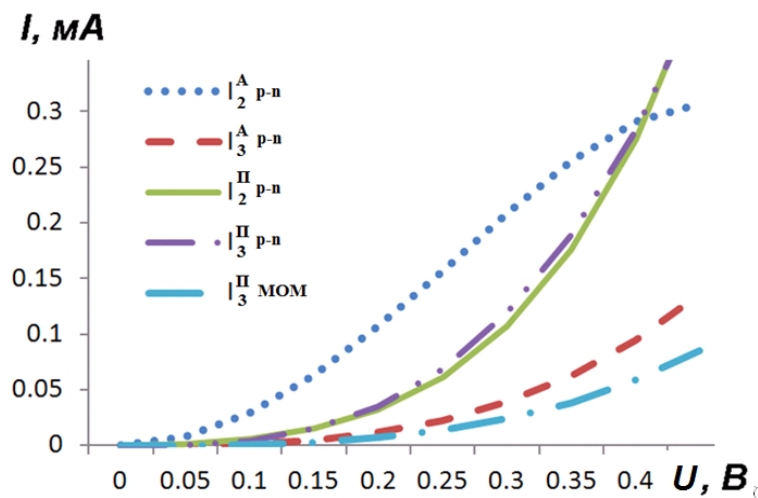


Рис. 3. Зависимости уровней гармоник от уровня индуцированного сигнала, созданного внешним электромагнитным полем

Из рис. 3 видно, что в случае несимметричной характеристики (рабочая точка находится на нелинейном участке), уровень второй гармоники превышает уровень третьей (на 20-40 дБ). В случае симметричной характеристики, без смещения рабочей точки, присутствует лишь третья гармоника. Причем, если ВАХ МОМ-структуры не полностью симметрична, то уровень третьей гармоники превысит уровень второй на 10-30 дБ. Из этого следует, если не учитывать искажение ВАХ нелинейных объектов во время зондирования, использование описанных методик идентификации НРС по соотношению уровней второй и третьей гармоник сигнала отклика являются корректными.

Заключение

Нахождение точной аналитической модели ВАХ полупроводника, облучаемом нелинейным локатором, представляется сложной задачи, которая эффективно реализуется с помощью использовать рядов Вольтерра с достаточной точностью аппроксимации. С помощью методики аппроксимации возможно повышение эффективности применения использования НР для идентификации нелинейных продуктов при разных уровнях гармониках составляющих сигнала отклика. В том числе, минимизацией влияния наличия возможных структур «метал-окисел-метал» в качестве немотивированного «закладного устройства» в процессе его поиска.

Литература

1. Зінченко М. В. Моделювання ансамблю симетричних вібраторів з нелінійними навантаженнями рядами Вольтерра-Пікара / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зіньковський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2010. – Вип. 41. – С. 148–156.
2. Зиньковский Ю.Ф. Моделирование рассеивателей в нелинейной радиолокации рядами Вольтерра / Ю.Ф. Зиньковский, М.В. Зинченко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. НТУУ «КПИ». – 2010. – Т. 53, № 11. – С. 54-64.
3. Колбанов А. П. Распознавание нелинейных рассеивателей, содержащих несовершенные

- металлические контакты или полупроводниковые радиокомпоненты / А. П. Колбанов, А. А. Потапов, Е. Е. Степанов, Е. П. Чигин // *Нелинейный мир*. – 2005. – Т. 3, № 4. – С. 239-244.
4. МВУ8 ПО ОВЕН. Руководство по эксплуатации. – М.: ОВЕН, 2010. – 70 с..
 5. Штейншлегер В. Б. Нелинейное рассеяние радиоволн металлическими объектами / В. Б. Штейншлейгер // *Успехи физических наук*. – 1984. – Т. 138. – Вып. 1. – С. 135-145.
 6. Зинченко М. В. Тестирование нелинейных радиолокаторов на надежность идентификации искомых объектов / М. В. Зинченко, Во Зуй Фук, Ю. Ф. Зиньковский // *Вестник НТУУ "КПИ". Серия Радиотехника. Радиоапаратостроение*. - 2017. - № 68. - с. 48-53.
 7. Во Зуй Фук. Инверсия соотношений уровней гармоник демаскирующего сигнала отклика в нелинейной радиолокации / Во Зуй Фук, М. В. Зинченко, Ю. Ф. Зиньковский // *Вестник НТУУ "КПИ". Серия Радиотехника. Радиоапаратостроение*. - 2016. - № 65. - с. 119-129.
 8. Куприянов А.И., Хорев А.А. Методы поиска электронных устройств перехвата информации с использованием нелинейных радиолокаторов // *Спец. техника*. – 2015. – N 3. – С. 12-26.
 9. Колбанов А. П. Распознавание нелинейных рассеивателей, содержащих несовершенные металлические контакты или полупроводниковые радиокомпоненты / А. П. Колбанов, А. А. Потапов, Е. Е. Степанов, Е. П. Чигин // *Нелинейный мир*. – 2005. – Т. 3, № 4. – С. 239-244.

References

1. Zinchenko, M. V. Modelyuvannya ansamblyu simetrichnikh vibratoriv z nelineinimi navantazhennymi ryadami Vol'terra-Pikara / M. V. Zinchenko, Yu. F. Zin'kovskii // *Visnik NTUU «KPI». Seriya Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannya*. – 2010. – Vip. 41. – S. 148–156.
2. Zinkovskii, Yu.F. Modelirovanie rasseivatelei v nelineinoy radiolokatsii ryadami Vol'terra / Yu.F. Zin'kovskii, M.V. Zinchenko // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radioelektronika. NTUU «KPI»*. – 2010. – T. 53, # 11. – S. 54-64.
3. Kolbanov A. P. Raspoznavanie nelineinykh rasseivatelei, soderzhashchikh nesovershennye metallicheskie kontakty ili poluprovodnikovye radiokomponenty / A. P. Kolbanov, A. A. Potapov, E. E. Stepanov, E. P. Chigin // *Nelineiny mir*. – 2005. – T. 3, # 4. – S. 239-244.
4. MVU8 PO OVEN. Rukovodstvo po ekspluatatsii. – М.: OVEN, 2010. – 70 s..
5. Shteinshleger V. B. Nelineinoe rasseyanie radiovoln metallicheskimi ob"ektami / V. B. Shteinshleiger // *Uspekhi fizicheskikh nauk*. – 1984. – Т. 138. – Вып. 1. – S. 135-145.
6. Zinchenko M. V. Testirovanie nelineinykh radiolokatorov na nadezhnost' identifikatsii iskomykh ob"ektov / M. V. Zinchenko, Vo Duy Phuc, Yu. F. Zin'kovskii // *Vestnik NTUU "KPI". Seriya Radiotekhnika. Radioaparotostroenie*. - 2017. - # 68. - s. 48-53.
7. Vo Duy, Phuc. Inversiya sootnoshenii urovnei garmonik demaskiruyushchego signala otklika v nelineinoy radiolokatsii / Vo Duy Phuc, M. V. Zinchenko, Yu. F. Zin'kovskii // *Vestnik NTUU "KPI". Seriya Radiotekhnika. Radioaparotostroenie*. - 2016. - # 65. - s. 119-129.
8. Kupriianov A.I., Horev A.A. *Metody poiska elektronnykh ustroystv perehvata informatsii s ispolzovaniem nelineinykh radiolokatorov* [Methods of electronic devices of information interception searching with nonlinear radar usage]. *Spets. tehnik*, 2015, no. 3, pp. 12-26.
9. Kolbanov A.P., Potapov A.A., Stepanov E.E., Chigin E.P. *Raspoznavanie nelineinykh rasseivatelei, soderzhashchikh nesovershennye metallicheskie kontakty ili poluprovodnikovye radiokomponenty* [Recognition of the nonlinear lenses containing imperfect metal contacts or semiconductor radio components]. *Nelineiny mir*, 2005, vo. 3, no. 4, pp. 239-244.

Рецензія/Peer review : 06.09.2017 р. Надрукована/Printed : 14.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. каф. КиПРА КПИ ім. І. Сикорського Яненко А. Ф.