

Исследование спектральных характеристик рассеивающих МОМ-структур в нелинейной локации

Зинченко М. В., Во Зуї Фук, Зиньковский Ю. Ф.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”

E-mail: zil157k@meta.ua

Исследована надежность детекторов нелинейных переходов (NLJD – Non Linear Junction Detector) при обнаружении радиоэлектронных устройств (РЭУ) и рассеивателей коррозионного происхождения типа “металл-окисел-металл” (МОМ-структур). Выявлено, что наличие в исследуемом пространстве МОМ-структур существенно ухудшает надежность NLJD при выявлении РЭУ с “малой” нелинейной эффективной площадью рассеивания (НЭПР) зондирующего сигнала. При этом задание пороговых уровней кратных гармоник и их соотношений не улучшит эффективность использования NLJD, что связано с особенностями вольт-амперных характеристик (ВАХ) МОМ-структур. Контакты между металлами Al, Cr, Ni имеют ВАХ с асимметрией, определяемые толщиной и площадью окисла. Асимметрия может быть двух типов – положительной и отрицательной, иметь явное и квази явное проявление. Показано, что выбор оптимального порогового соотношения гарантирует надежность NLJD лишь при обнаружении МОМ-структур с квази явными асимметриями ВАХ двух типов. В случае МОМ-структур с явной асимметрией ВАХ двух типов, обеспечение должной эффективности использования NLJD изначально требует существенного снижения уровней побочных излучений передающей антенны.

Ключевые слова: детектор нелинейных переходов; структуры “металл-окисел-металл”; нелинейные продукты сигнала отклика

Введение

Для поиска устройств несанкционированного доступа к информации, взрывоопасных предметов с электронной элементной базой, идентификационных радиомаркеров и т. п. часто используют детектор нелинейных переходов (NLJD – Non Linear Junction Detector). Преимущество NLJD в сравнении с детектором поля и анализатором спектра состоит в возможности выявлять радиоэлектронные устройства (РЭУ), которые не излучают демаскирующие электромагнитные поля [1]. Искомое РЭУ для NLJD является “электронным” нелинейным рассеивателем (НРс) с эквивалентной антенной структурой и нелинейными нагрузками в виде полупроводниковых элементов. Зондирование NLJD нелинейных рассеивателей осуществляется моногармоническим или импульсным СВЧ сигналом. В процессе облучения зондирующим сигналом (ЗС) объекта поиска в пространство излучаются нелинейные продукты (НП) сигнала отклика (СО), например кратные гармоники. Выявление с помощью NLJD “значимых” по уровню НП свидетельствует о вероятном наличии РЭУ в исследуемом пространстве. Пространство поиска РЭУ часто содержат “природные” (естественные) НРс коррозион-

ного происхождения типа “металл-окисел-металл” (МОМ-структуры). Зондируемые МОМ-структуры также излучают НП в спектре СО, тем самым усложняют выявление искомым объектов. Различение “электронных” и “природных” НРс возможно с помощью анализа соотношения уровней мощности второй и третьей гармоник частоты ЗС. Для “электронных” НРс уровень второй гармоники превышает уровень третьей на 20 – 40 дБ, а для МОМ-структур выполняется обратное соотношение. Различное соотношение уровней принятых гармоник связано с формой вольт-амперных характеристик (ВАХ) нелинейных объектов. Полупроводниковым элементам в составе РЭУ соответствуют несимметричные ВАХ, МОМ-структурам – симметричные. В проблеме технической защиты информации широко используются нелинейные радиолокаторы (НР) для обнаружения радиоэлектронных закладных устройств (ЗУ) различного назначения. Особенно НР актуальны при выявлении «пассивных» ЗУ, обнаружение которых с помощью детекторов поля, анализаторов спектра, селективных вольтметров и других приборов невозможно, так как в пространство не излучается демаскирующее электромагнитное поле достаточной мощности [1, 2].

Частота зондирования для NLJD обычно составляет 0,6 – 1 ГГц, что обеспечивает хорошую узконаправленность передающей антенны и достаточное проникновение сигнала в диэлектрическую среду. Детекторы нелинейных переходов делятся на импульсные (выходная мощность 100 – 600 Вт в импульсе, частота следования импульсов 400-100.10³ Гц при скважности 100 – 1000) и непрерывного действия (выходная мощность до 1,5 Вт). Коэффициент усиления передающей антенны NLJD не менее 6 дБ, а приёмной — не менее 8 дБ. Динамический диапазон приёмников NLJD не меньше 40 дБ, их чувствительность не хуже -80 (-130) дБ/Вт (при соотношении сигнал/шум 6 дБ). Поляризация антенн круговая, коэффициент эллиптичности не хуже 0,8. Уровень заднего лепестка диаграммы направленности (ДН) передающей и приёмной антенн не больше -15 дБ [1].

1 Постановка задачи

Типичное искомое РЭУ имеет сложную эквивалентную антенную структуру с несистематизированной топологией. Качественно такая “случайная” антенна является ансамблем диполей разной длины и ориентации. Элементарными диполями выступают выводы радиоэлектронных приборов, дорожки печатных плат, металлизированные поверхности и т. д. По соотношению к длине волны ЗС NLJD антенные структуры РЭУ делятся на “электрически малые” (меньше $0,1\lambda_{ЗС}$) и “электрически соизмеримые”. Соответственно “электрически малым” антенным структурам свойственна малая нелинейная эффективная площадь рассеивания (НЭПР) зондирующего сигнала. Поэтому НРС с “малой” НЭПР характеризуются “слабым излучением” НП при зондировании. Рассеиватели с “электрически соизмеримыми” антенными структурами имеют сравнительно “большую” НЭПР и излучают во время зондирования достаточно мощный сигнал отклика [3].

Повышение эффективности использования NLJD в условиях рассеивателей коррозионного происхождения предполагает задание пороговых уровней принятых кратных гармоник Q_i и их соотношения $L_{i,j}$ (i, j – номера гармоник, $i, j = 2, 3, \dots$ далее просто L). Величина L может служить критерием верной идентификации НРС, особенно при зондировании среды “маломощными” NLJD. Выбор значения L требует рационального удовлетворения двум требованиям: повышение эффективности обнаружения и идентификации РЭУ и уменьшение вероятности их пропуска в случае “малой” НЭПР. Поэтому актуальным становится целесообразность завышения порогового соотношения L для повышения надежности NLJD в обнаружении РЭУ с “малой” НЭПР в условиях рассеивающих МОМ-структур [4].

Целью статьи является исследование спектрального состава сигнала отклика от рассеивающих МОМ-структур с асимметричной вольт-амперной характеристикой. А именно, выявить надежность низких пороговых значений на соотношения уровней принятых гармоник сигнала отклика (в качестве идентификационного признака).

2 Основная часть

Проявление эффекта нелинейного рассеяния радиоволн облученными МОМ-структурами характерно в местах контактов металлизированных поверхностей, ослабленных соединениях металлических деталей и т. п. Тонкую пленку окисла в месте контакта металлических поверхностей можно считать диэлектриком или высокоомным полупроводником. При достаточно малой толщине пленки окисла (менее нескольких десятков ангстрем) основным механизмом переноса носителей заряда через контакт металлов, разделенных такой пленкой, как правило, является туннельный эффект. В случае контакта металлов для напряжений менее 1 В вольт-амперная характеристика МОМ-структуры описывается выражением:

$$I = \frac{U + \beta U^3}{R_0},$$

где U – разность потенциалов на контакте, I – туннельный ток через контакт, β – коэффициент нелинейности, $R_0 = \rho_0/a_T$ – начальное (при $U = 0$) сопротивление контакта, ρ_0 – удельное сопротивление контакта, a_T – площадь контакта.

Величины ρ_0 и β определяются высотой барьера ψ_0 , толщиной диэлектрической пленки s и величиной относительной диэлектрической проницаемости окисла ϵ [5]. С изменением s или ψ_0 вдвое величина ρ_0 изменится на несколько порядков, а коэффициент β несущественно. Коэффициент нелинейности стремится к 1 (V^{-2}) при значениях $s = (10 - 30)$ А и $\psi_0 = (1 - 2)$ В [5].

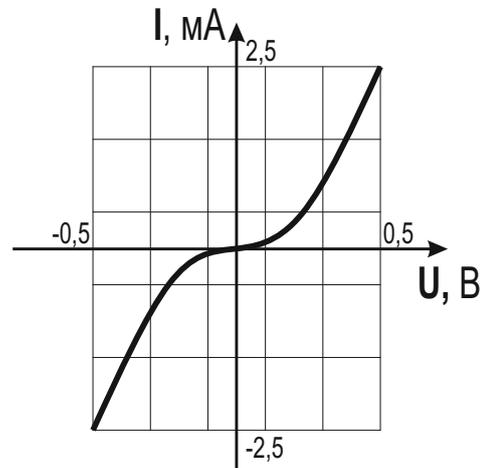


Рис. 1. ВАХ контакта стальных шаров с окисленной поверхностью

Для МОМ-структур из одинаковых металлов характерна симметричная ВАХ (см. рис. 1): контакт стальных шаров радиусом 3 мм, поверхность которых после полировки окислена на воздухе в течении 8 часов при 400⁰С [3, 5].

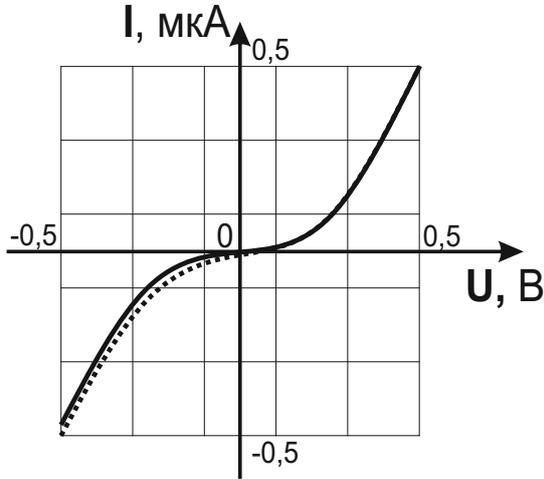


Рис. 2. ВАХ контакта Ni-Au с квазизявной асимметрией (сплошная линия)

Анализ ВАХ МОМ-структур из неодинаковых металлов также основывается на теории туннелирования [6]. В работах [6, 7] экспериментально подтверждено предсказания теории туннелирования для точечных МОМ-диодов на контакте разных металлов. На рис. 2 приведен пример ВАХ МОМ-диода с площадью оксидной пленки $2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Для вольт-амперных характеристик МОМ-диодов в зависимости от толщины оксида и его свойств характерна асимметричность (на рис. 2 эта асимметрия не существенна – квазизявная).

Каждая ветвь ВАХ МОМ-структуры (прямая и обратная) характеризуется нелинейным участком и точкой перегиба. Если напряжения, соответствующие точкам перегиба двух ветвей ВАХ U_1 и U_2 , равны по модулю и противоположны по знаку, то имеем симметричную характеристику. В противном случае ВАХ асимметрична. В свою очередь асимметричная ВАХ МОМ-структуры может иметь положительную или отрицательную асимметрию.

Вид асимметрии ВАХ определяет местоположение точки пересечения касательных при U_1 и U_2 . Если точка пересечения рассмотренных касательных в области $U > 0$ и $I > 0$ (точка A_1 на рис. 3), то имеем положительную асимметрию. Нахождение точки в области $U < 0$ и $I < 0$ свидетельствует про отрицательную асимметрию (точка A_2 на рис. 3). Тип асимметрии для контакта одних и тех же металлов может быть различным. Экспериментально обнаружено на примере контактов между металлами Al, Cr, Ni (эти материалы легко окисляются на воздухе при температуре окружающей среды или слегка повышенных температурах), что асимметрия определяется толщиной и площадью окисла. Это

связано с тем, что при образовании на металлах достаточно толстых оксидных слоев, эффективность туннелирования может существенно снизиться. Например, структура Al-Al₂O₃-Al может иметь ярко выраженную (явную) асимметрию ВАХ двух типов [6].

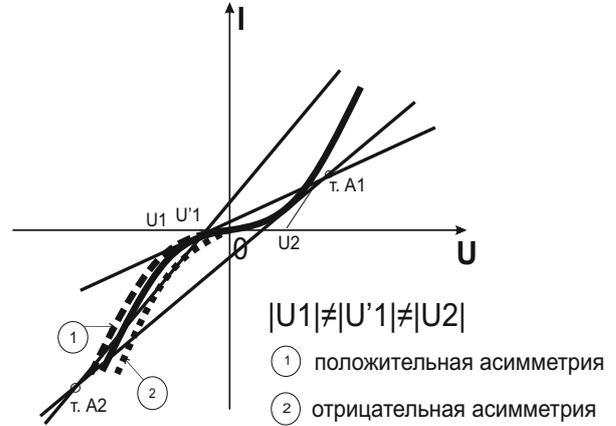


Рис. 3. Определение положительной и отрицательной асимметрии ВАХ

На рис. 4 представлено нормированное семейство ВАХ МОМ-структур, состоящее из симметричной и асимметричных кривых с квазизявной и явной асимметриями.

Для исследования влияния формы ВАХ МОМ-структур на соотношение уровней НП в спектре преобразованного сигнала воспользуемся методом аппроксимирующих функций.

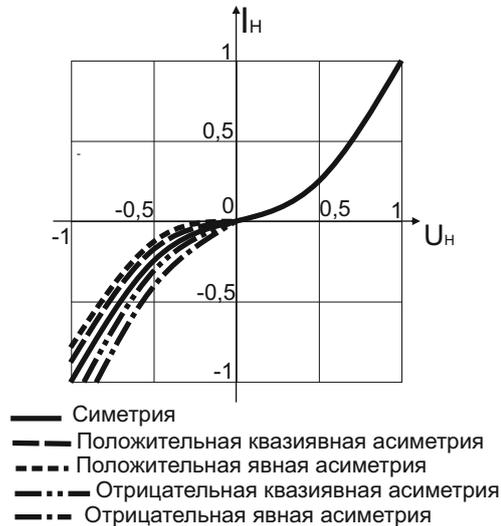


Рис. 4. Семейство форм нормированных ВАХ для МОМ-структур

Выполним аппроксимацию ВАХ на рис. 4 полиномами n -го порядка для оценки уровней новых спектральных составляющих при воздействии наведенного ЗС напряжения. Аппроксимация предусматривает формирование системы из n уравнений вида:

$$I(U_n)_n = a_1 U_n + a_2 U_n^2 + \dots + a_{n-1} U_n^{n-1} + a_n U_n^n, \quad (1)$$

где a_1, \dots, a_n – коэффициенты аппроксимации [8].

Точность аппроксимации ВАХ зависит от степени полинома, его большой порядок может приводить к возникновению осцилляции аналитических функций, поэтому ограничимся 5-й степенью.

В табл. 1 представлены коэффициенты аппроксимации форм нормированных ВАХ на рис. 4.

Явная и квазивяная асимметрии определяются наличием весомых по значению парных коэффициентов аппроксимирующего полинома (в случае симметричной ВАХ парные коэффициенты равны нулю).

Примем, что при моногармоническом воздействии ЗС на МОМ-структуре возникнет напряжение

$$V(t) = U_{mn} \cdot \cos(\omega_0 t + \theta), \quad (2)$$

где U_{mn} – нормированная амплитуда наведенного напряжения ЗС НР, ω_0 – круговая частота ЗС НР, θ – его начальная фаза. С использованием (2) и (1) получим аппроксимирующие функции уровней спектральных компонент на второй и третьей гармониках [8]:

$$I_2(2\omega_0) = a_2 0,5 U_{mn}^2 + a_4 0,5 U_{mn}^4, \quad (3)$$

$$I_3(3\omega_0) = a_3 0,25 U_{mn}^3 + a_5 0,312 U_{mn}^5, \quad (4)$$

где a_2, \dots, a_5 – коэффициенты аппроксимации ВАХ. Согласно выражениям (3) и (4) рассчитаны для разных форм ВАХ МОМ-структур соотношения уровней второй и третьей гармоник (I_2/I_3) в зависимости от нормированной амплитуды индуцированного напряжения ЗС НР (рис. 5).

При этом рассмотрим наихудший случай – зондирование маломощным сигналом, когда нормированная амплитуда наведенного напряжения ЗС U_{mn} не превышает значение 0,1 относительно $|U_n| = 1$. По каждому дискретному значению порогового соотношения L рассчитаны значения максимальной частоты ошибочной идентификации МОМ-структур согласно выражению $\psi_q(L) = [l_q(L)/0,1] \cdot 100\%$, где l_q – ширина диапазона U_{mn} , в котором $I_2/I_3 \geq L$, q – порядковый номер соответствующей формы ВАХ, ($q = \overline{1,4}$).

Вероятность верной идентификации РЭУ в условиях МОМ-структур при зондировании маломощным сигналом с учетом порогового соотношения L равна $p_q(L) = [100 - \psi_q(L)]\%$.

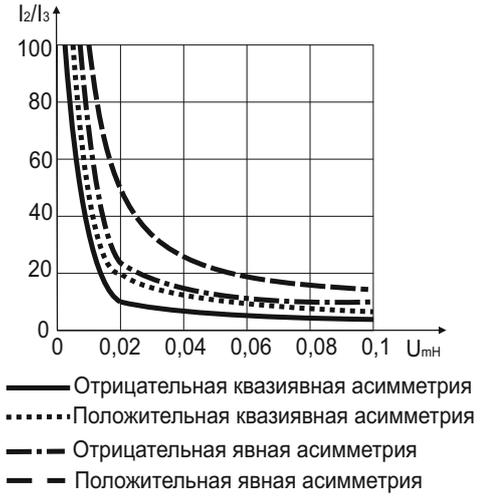


Рис. 5. Распределение соотношения уровней гармоник в зависимости от индуцированного сигнала

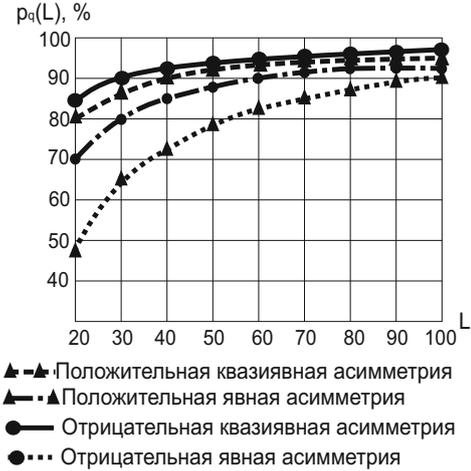


Рис. 6. Распределения $p_q(L)$ в условиях МОМ-структур с разными типами форм ВАХ при зондировании маломощным сигналом

На рис. 6 приведены распределения $p_q(L)$ для МОМ-структур с разными типами форм ВАХ. Из рис. 6 видно, что наибольшие трудности при верной идентификации РЭУ создают в исследуемом пространстве МОМ-структуры с явной асимметрией ВАХ двух типов. Особенно это имеет место при попадании таких коррозионных образований под зону действия боковых лепестков передающей антенны NLJD (пример зондирования маломощным сигналом). В таком случае повысить надежность NLJD можно лишь большим снижением уровней побочных излучений передающей антенны, поскольку само по себе завышение порогового соотношения приведет к росту вероятности пропуска РЭУ. Для МОМ-структур с квазивяными асимметриями ВАХ двух типов надежность NLJD допустимо осуществлять выбором оптимального порогового соотношения L .

Табл. 1 Коэффициенты аппроксимации ВАХ МОМ-структур

Формы ВАХ МОМ-структур	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Симметричная	0,256	0,000	0,279	0,000	0,465
С квазиявной положительной асимметрией	0,246	0,045	0,224	-0,009	0,498
С явной положительной асимметрией	0,237	0,090	0,169	-0,019	0,530
С квазиявной отрицательной асимметрией	0,267	-0,058	0,369	-0,031	0,450
С явной отрицательной асимметрией	0,284	-0,137	0,461	-0,006	0,388

3 Выводы

Детекторы нелинейных переходов (NLJD – Non Linear Junction Detector) широко применяются для поиска скрытых радиоэлектронных устройств (РЭУ). Пространство поиска РЭУ часто содержит “природные” (естественные) НРС коррозионного происхождения типа “металл-окисел-металл” (МОМ-структуры). Зондируемые МОМ-структуры и РЭУ излучают нелинейные продукты в спектре сигнала отклика, тем самым возникают трудности в выявлении искомых объектов. Различение “электронных” и “природных” рассеивателей возможно с помощью анализа соотношения уровней мощности второй и третьей гармоник частоты зондирующего сигнала. Особые проблемы МОМ-структуры создают при выявлении РЭУ с “малой” нелинейной эффективной площадью рассеивания зондирующего сигнала. Повышение эффективности использования NLJD в таких случаях предполагает задание пороговых уровней кратных гармоник и их соотношений. Но в некоторых случаях, этого не достаточно, что связано с особенностями вольт-амперных характеристик (ВАХ) МОМ-структур. Контакты между металлами Al, Cr, Ni (эти материалы легко окисляются на воздухе при температуре окружающей среды или слегка повышенных температурах) имеют ВАХ с асимметрией, определяемые толщиной и площадью окисла. Асимметрия может быть двух типов – положительной и отрицательной, иметь явное и квазиявное проявление. Выбор оптимального порогового соотношения гарантирует надежность NLJD лишь при обнаружении МОМ-структур с квазиявными асимметриями ВАХ двух типов. В случае МОМ-структур с явной асимметрией ВАХ двух типов, обеспечение должной эффективности использования NLJD изначально требует существенного снижения уровней побочных излучений передающей антенны.

Перечень ссылок

1. Хорев А. А. Методы и средства поиска электронных устройств перехвата информации Ч. 3 / А. А. Хорев – М. : МО. – 1998. – 224 с.
2. 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.

3. Во Зуи Фук Инверсия соотношений уровней гармоник демаскирующего сигнала в нелинейной радиолокации / Фук ВоЗуй, М.В. Зинченко, Ю.Ф. Зиньковский // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2016. – № 65. – с. 119-129.
4. Зинченко М. В. Тестирование нелинейных радиолокаторов на надежность идентификации объектов / М.В. Зинченко, ЗуиФук Во, Ю.Ф. Зиньковский // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2017. – № 68. – с. 48-53.
5. Штейншлегер В. Б. Нелинейное рассеяние радиоволн металлическими объектами / В. Б. Штейншлейгер // Успехи физических наук. – 1984. – Т. 138. – Вып. 1. – С. 135-145.:
6. Wiesendanger E. Thin-film MOM-diodes for infrared detection / E. Wiesendanger, F. Kneubuhl // Applied Physics, 13, №4, 1977. – P 343-349
7. Ватова Л. Б. Токи в точечно-контактных системах металл-окисел-металл / Л. Б. Ватова, А. А. Ривлин, В. С. Соловьев // Радиотехника и электроника. - 1974. - Вып. 3. – с. 590-603.
8. Волошин А. П. Анализ и расчет амплитудного спектра тока СВЧ смесительного диода при полигармоническом воздействии / А. П. Волошин, Г. А. Ена, Ю. Г. Никитенко // Известия вузов. Радиоэлектроника. - 2007. - Т. 50, № 2. - с. 55-65.

References

- [1] Horev A. A. (1998) *Metody i sredstva poiska elektronnyh ustroystv perehvata informacii* [Methods and tools for electronic data capturing devices]. Moscow, 224 p.
- [2] Kolbanov A. P., Potapov A. A., Stepanov E. E., and Chigin E. P. (2005) Raspoznavanie nelineinykh rasseivatelei, soderzhashchih nesovershennye metallicheskie kontakty ili poluprovodnikovye radiokomponenty [Recognition of the nonlinear lenses containing imperfect metal contacts or semiconductor radio components]. *Nelineinyi mir*, Vol. 3, No. 4, pp. 239-244.
- [3] Vo Duy Phuc, Zinchenko M. V. and Zinkovskiy Yu. F. (2016) Inversion ratio of the harmonics levels of the unmasking signal in the nonlinear radar. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparobuduv.*, no. 65, pp. 119-129. (in Russian)
- [4] Zinchenko M. V., Vo Duy Phuc, Zinkovskiy Yu. F. (2017) The nonlinear radar testing on the reliability of the objects' identification. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparobuduv.*, no. 68, pp. 48-53. (in Russian)
- [5] Shteinshleiger V. B. (1984) Nonlinear scattering of radio waves by metallic objects. *Sov. Phys. Usp.*, Vol. 27, pp. 60–68. DOI: 10.1070/PU1984v027n01ABEH004020

- [6] Wiesendanger E. and Kneubuhl F. (1977) Thin-film MOM-diodes for infrared detection. *Applied Physics*, Vol. 13, No 4, pp. 343-349. DOI: 10.1007/bf00882608
- [7] Vatova L. B., Rivlin A. A. and Solovov V. S. (1974) Toki v tochechno-kontaknyh sistemah metall-okisel-metall [Currents of point-contact systems metal-oxide-metal]. *Radiotekhnika i elektronika*, Vol. 3, pp. 590-603.
- [8] Voloshin A. P., Iena G. A and Nikitenko Yu. G. (2007) Analysis and Calculation of Current-Flow Amplitude Spectrum of a Microwave Mixer Diode at Poly-Harmonic Excitation. *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 50, No. 2, pp. 95-103. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0735272707020094>

Дослідження спектральних характеристик розсіюючих MOM-структур в нелінійній локації

Зінченко М. В., ВоЗуй Фук, Зінковський Ю. Ф.

Досліджена надійність детекторів нелінійних переходів (NLJD – Non Linear Junction Detector) при виявленні радіоелектронних пристроїв (РЕП) і розсіювачів корозійного походження типу “метал-окисел-метал” (MOM-структур). Виявлено, що наявність в досліджуваному просторі MOM-структур істотно погіршує надійність NLJD при виявленні РЕП з “малою” нелінійною ефективною площею розсіювання (НЕПР) зондуючого сигналу. При цьому завдання порогових рівнів кратних гармонік і їх співвідношень не поліпшить ефективність використання NLJD, що пов'язано з особливостями вольт-амперних характеристик (ВАХ) MOM-структур. Контакти між металами Al, Cr, Ni мають ВАХ з асиметрією, що визначаються товщиною та площею окислу. Асиметрія може бути двох типів – позитивною і негативною, мати явний і квазіявний прояв. Показано, що вибір оптимального порогового співвідношення гарантує надійність NLJD лише при виявленні MOM-структур з квазіявними асиметріями ВАХ двох типів.

В разі MOM-структур з явною асиметрією ВАХ двох типів, забезпечення належної ефективності використання NLJD спочатку вимагає істотного зниження рівнів побічних випромінювань передавальної антени.

Ключові слова: детектор нелінійних переходів; структури “метал-окисел-метал”; нелінійні продукти сигналу відгуку

Study of the spectral characteristics of the Scattering of MOM-structures in non-linear locations

Zinchenko, M. V., Vo Duy, Phuc, Zinkovskii, Yu. F.

The reliability of non-linear junction detectors (NLJD) at detection of radio-electronic devices (RD) and scatterers of corrosion origin of the type “metal-oxide-metal” (MOM-structures) is investigated. It is revealed that the presence of MOM-structures in the study space substantially impair the reliability of NLJD at revealing RD with the “small” non-linear effective area of dispersion (NEAD) of the probing signal. In this case determination of threshold levels of multiple harmonics and their ratios will not improve the efficiency of the NLJD use, which is associated with the peculiarities of MOM-structures current-voltage characteristics (CVC). The contacts between the metals Al, Cr, Ni have CVC with asymmetry, which are determined by the thickness and area of the oxide. The asymmetry can be of two types – positive and negative, have a clear and quasi-clear manifestation. It is shown that the choice of the optimal threshold ratio ensures the reliability of NLJD only upon detection of MOM-structures with quasi-clear CVC asymmetries of two types. In the case of MOM-structures with a clear CVC asymmetry of two types, the efficiency of the use of NLJD initially requires a significant decrease of levels of spurious emissions of the transmitting antenna.

Key words: non-linear junction detector; structure “metal-oxide-metal”; non-linear products of response signal