

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ. II<sup>1</sup>

КОНОВАЛЬЦЕВ А.А., ОМАРОВ М.А.,  
ПАЩЕНКО Д.А., ШОКАЛО В.М.

Обобщается отечественный и зарубежный опыт исследований в области электродинамических структур с распределенными нелинейными элементами. Основное внимание уделяется функционально-нелинейным структурам, принцип работы которых базируется на использовании нелинейных эффектов.

### 3. Функционально-нелинейные электродинамические структуры

Согласно приведенной в [1] классификации, к электродинамическим структурам данной группы относятся активные антенны и функциональные устройства тракта передачи, предназначенные для генерации, усиления мощности, преобразования частоты сигналов, а также для их детектирования и выпрямления высокочастотных колебаний. Вплоть до частоты 40 ГГц эти устройства выполняются на нелинейных элементах с сосредоточенными параметрами по гибридной технологии.

Современная радиоэлектроника КВЧ и ГВЧ диапазонов характеризуется интенсивным развитием нового научно-технического направления – функциональной электроники, отличительной особенностью которой является интеграция функций, выполняемых простейшими в функциональном отношении компонентами (излучателями, отрезками линий передачи энергии, активными элементами и т.д.). Известно, что устройства функциональной электроники представляют собой полупроводниковые интегральные структуры, которые выполняют достаточно сложные законченные функции и неделимы на отдельные компоненты. Именно такими устройствами и являются интегрированные ЭСРН, конструкции которых выполняются в виде монолитных интегральных схем. Существует множество разработок интегрированных ЭСРН, функционирующих, как правило, в диапазоне частот (40 – 250) ГГц [2]. Тем не менее, частота 250 ГГц не является пределом. Наибольшее достижение по освоению частотного диапазона – это создание антенны-смесителя с рабочей частотой 761 ГГц [2]. Основные ограничения, препятствующие повышению рабочих частот интегрированных ЭСРН, – это потери в проводниках и диэлектриках микросхем и точность изготовления, обусловленная той или иной технологией производства.

Излучающие интегрированные ЭСРН уже нашли применение в информационных и энергетических радиоэлектронных системах для генерации электромагнитных волн (антенны-генераторы) [3], преобразования частоты сигналов (антенны-смесители, антенны-умножители) [2], детектирования и выпрямления (антенны-детекторы и ректенны) [4, 5]. Основные области применения интегрированных ЭСРН – радиоэлектронные системы связи, беспроводная передача энергии и радиовидение.

Рассмотрим характерные примеры функционально нелинейных интегрированных излучающих структур, все многообразие которых можно свести к двум разновидностям. Первая из них – это интегрированные ЭСРН с “чисто” распределенной нелинейностью, у которых активные элементы занимают существенную часть площади или всю площадь подложки микросхемы. В технике подобные ЭСРН представлены пока большим количеством реальных разработок.

Одной из них является приведенная на рис. 12 антенна-генератор [3]. Эта антенна представляет собой монолитную интегрированную схему, состоящую из генератора миллиметровых волн и пере-

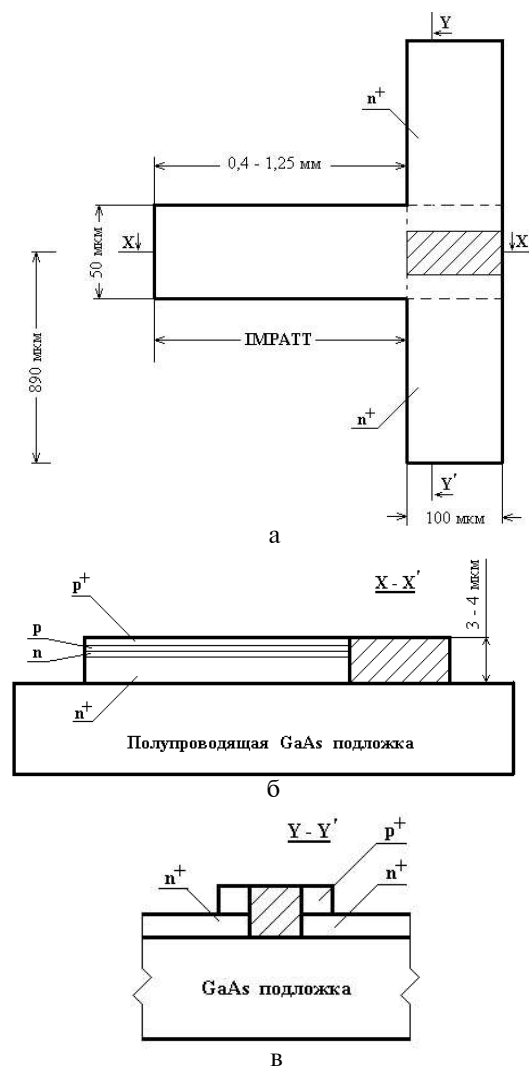


Рис. 12. Монолитная n-GaAs вибраторная антенна - генератор с распределенным IMPATT – диодом

<sup>1</sup> Ч.1 см. в журнале “Радиоэлектроника и информатика”. 2000, № 2. С.17-21.

дающей n-GaAs антенны. Основным элементом генератора является распределенный GaAs IMPATT-диод. Схема функционирует на частоте 168 ГГц, при этом КПД излучателя довольно высок (до 80%). Необходимое распределение проводимости по длине полупроводниковой антенны реализовывалось на этапе ее изготовления.

Типичной электродинамической структурой с непрерывно распределенной нелинейностью являются и антенны-выпрямители (ректенны) миллиметрового диапазона волн. Так, в [5] показано, что для изготовления на частотах выше 94 ГГц ректенных элементов вся их поверхность (приемная микрополосковая антенна, интегрированная с выпрямительным диодом) должна полностью выполняться либо из арсенида галлия, либо из фосфида индия. При этом сами по себе выпрямительные диоды диапазона КВЧ имеют распределенную структуру (рис. 13,а). Согласно [5] такие структуры обеспечивают снижение сопротивления потерь диода  $R_S$  от 4 до 2 Ом. Величина  $R_S = 4$  Ома — это типичное значение  $R_S$  выпрямительного диода Шоттки СВЧ диапазона, структура которого показана на рис. 13,б.

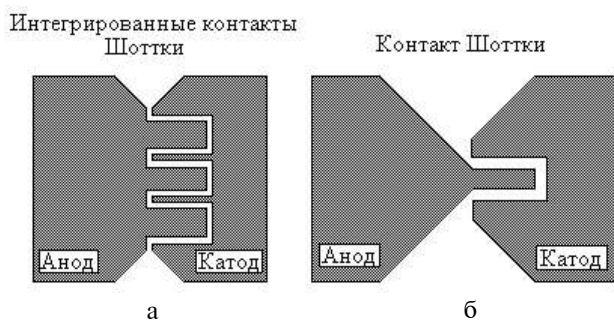


Рис. 13. Топология выпрямительных диодов Шоттки

Вторая разновидность функционально-нелинейных электродинамических структур — это монолитные интегральные схемы, содержащие один или множество сосредоточенных нелинейных активных элементов. Подобные структуры представлены в технике значительным количеством реальных разработок, отличающихся многообразием конструктивного исполнения и функционального назначения.

На рис. 14 – 18 приведено несколько примеров интегрированных с сосредоточенными нелинейными элементами антенн. Двухэлементная, нагруженная на диод приемная антенна применяется как облучатель линзы [2] (рис.17). Планарный диод напылен на одну подложку совместно с излучателями и отрезками линий передачи. Топология диода такая же, как и на рис.13,б. Аналогичная структура нелинейного элемента присуща и слабонаправленной антенне-детектору [2] (рис.15). В рассмотренных примерах конструкции слабонаправленных антенн являются многослойными и содержат как полупроводниковые подложки, так и защитные покрытия. Последние в отдельных случаях позволяют улучшить характеристики ЭСРН (см. рис.15,б).

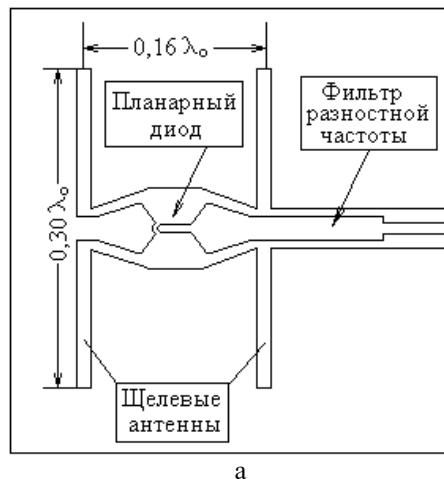


Рис. 14. Двухэлементная приемная антенна миллиметрового диапазона: а – топология; б – общий вид. Многослойность конструкций характерна и для направленных интегрированных антенн, выполняемых на основе решетчатых структур (рис.16 – 18). Функционально-нелинейные антенные решетки на сосредоточенных НЭ одновременно являются и потенциально нелинейными электродинамическими структурами с распределенной нелинейностью в силу возможности возникновения в них нежелательных протяженных нелинейных контактов на границе металл–полупроводник (см. [1]).

Влияние нежелательных распределенных нелинейностей пока не изучалось. Однако, основываясь на известных результатах исследований сосредоточенных паразитных барьеров Шоттки, можно прогнозировать, что это влияние может быть значительным. Например, в [6] решена задача рассеяния электромагнитных волн сетчатыми структурами, у которых в местах контактов проводников с высокой проводимостью из-за окисления образуются барьеры Шоттки. Показано, что импедансы переходов Шоттки существенно влияют на отражательные свойства сетчатых структур.

Влияние нежелательных распределенных барьеров Шоттки в изображенных на рис. 14 – 18 интегрированных ЭСРН может проявиться при воздействии на них мощных непрерывных и импульсных электромагнитных излучений систем функционального поражения [7]. При воздействии таких систем “вредные” нелинейные эффекты возникают в ЭСРН и в результате наличия сосредоточенных НЭ.

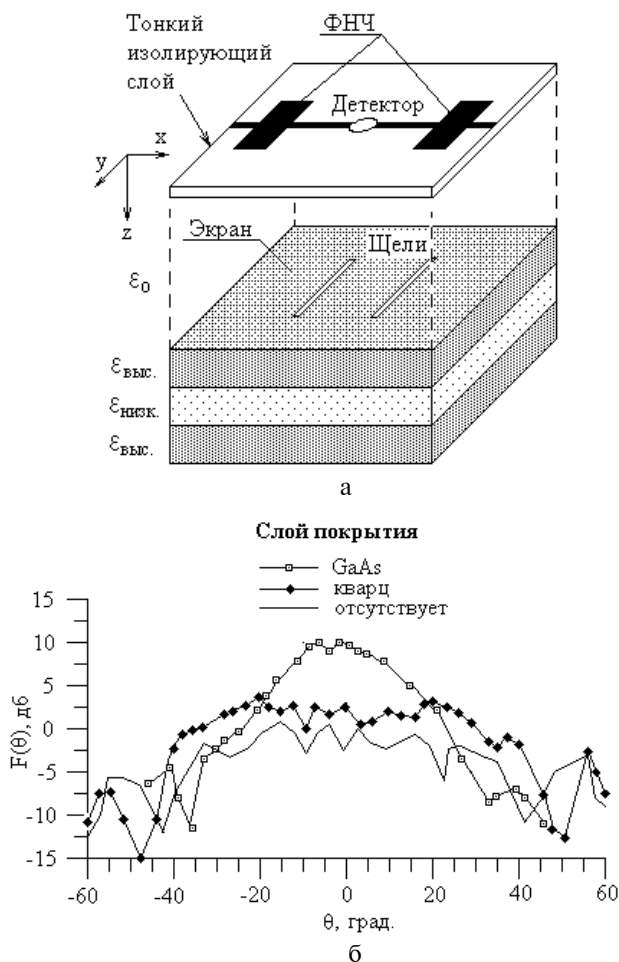


Рис. 15. Антенна-детектор: а – многослойная структура; б – диаграмма направленности на частоте 94 ГГц в плоскости Н

Влияние сосредоточенных активных элементов со слабой и сильной нелинейностью на параметры интегрированных микроволновых устройств исследовано детально [8]. Но поток публикаций в этом направлении постоянно растет. Основные изыскания связаны с анализом побочного излучения систем КВЧ и ГВЧ диапазонов и расширением исследований по изучению переходных процессов в интегрированных ЭСРН. Один из примеров таких работ – это обзор [9], где рассмотрены нелинейные эффекты, приводящие к появлению в тракте передачи оптического диапазона интермодуляционных составляющих третьего порядка. Другой пример – статья [10], которая посвящена исследованию особенностей прохождения импульсных сигналов через отрезки линий передачи, ограниченные сосредоточенными элементами с нелинейными характеристиками (р-і-n-диодами). Здесь показано, что нелинейная динамика передающих линий, ограниченных диодными структурами, различна для импульсного возбуждения и возбуждения СВЧ сигналом; ее исследование важно для проектирования СВЧ трактов, устойчивых к воздействию электромагнитных импульсных помех.

Из приведенных примеров следует, что в опубликованных работах изучено достаточно много частных случаев влияния того или иного механизма нелинейности на характеристики излучающих и неизлучающих ЭСРН.

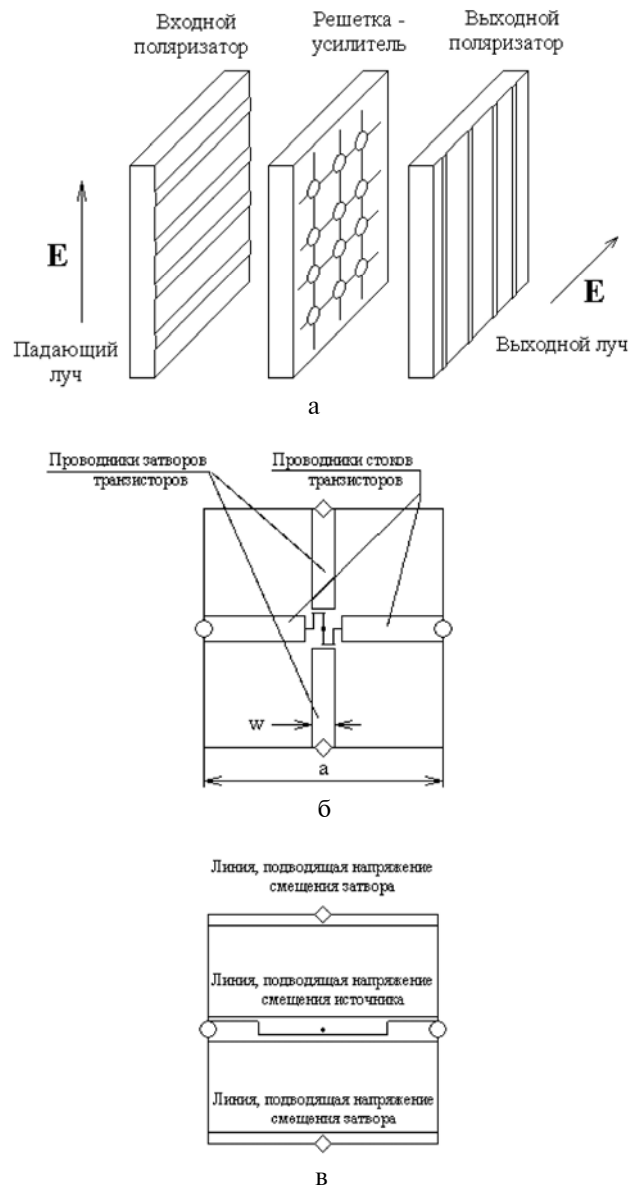


Рис. 16. Решетка - усилитель

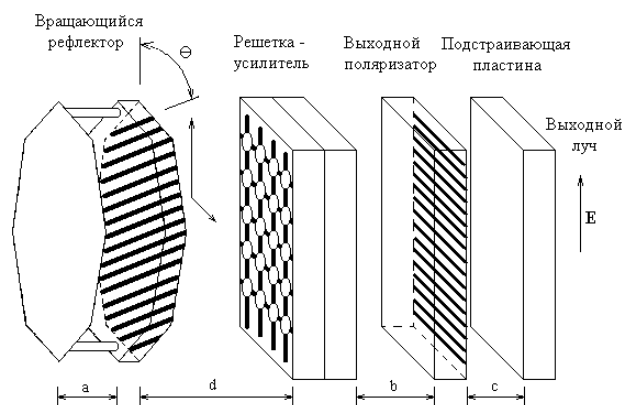


Рис. 17. Антенна-генератор на полевых транзисторах

Однако модели, учитывающие совокупное влияние нелинейных эффектов различной природы на параметры интегрированных электродинамических структур с распределенной нелинейностью, пока исследователями не рассматривались.

Таким образом, нелинейные эффекты в интегрированных схемах КВЧ и ГВЧ диапазонов с “чисто” распределенной нелинейностью, а также с вклю-

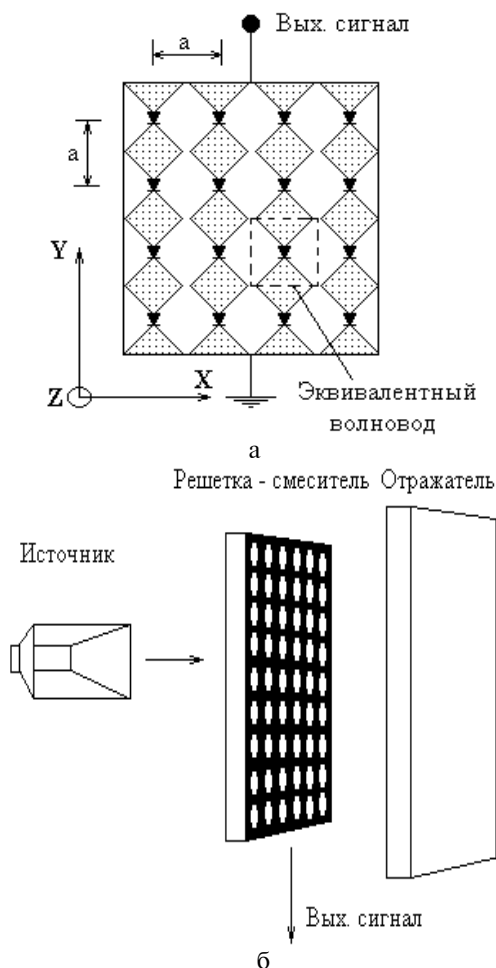


Рис. 18. Антенна-смеситель

ченными сосредоточенными НЭ слабо изучены из-за отсутствия развитой теоретической базы, позволяющей проводить анализ при одновременном действии нескольких механизмов нелинейности.

#### 4. Выводы и направления развития теории электродинамических систем с распределенной нелинейностью

Проведенное обобщение мирового опыта проектирования и применения ЭСРН позволяет сделать следующие заключения.

1. Основой создания большого многообразия ЭСРН с широким спектром одновременно выполняемых функций (генерация и излучение электромагнитных волн, прием и первичная обработка сигналов и т.д.) являются современные технологии функциональной электроники.
2. Применение ЭСРН в радиоэлектронных системах радиовидения, связи и беспроводной передачи энергии КВЧ и ГВЧ диапазонов дает возможность расширить функциональные возможности РЭС и улучшить их технические характеристики.
3. ЭСРН, как устройства функциональной электроники, можно разделить на две большие группы:
  - электродинамические структуры с распределенной нелинейностью, функционирующие на принципе управления импедансом материальных сред;
  - электродинамические структуры, интегрированные на базе полупроводниковых подложек с сосредоточенными нелинейными активными элементами.

4. Вне зависимости от принадлежности к какой-либо из групп, в ЭСРН одновременно могут действовать несколько различных механизмов нелинейности, приводящих к появлению “вредных” нелинейных эффектов. Последние вызывают дополнительные трудности в решении проблемы электромагнитной совместимости РЭС и безыскаженной передачи информации.

5. Проектирование ЭСРН проводится с использованием упрощенных моделей, пригодных для расчета только характеристик, относящихся к их функциональному назначению. Влияние “вредных” нелинейных эффектов при этом практически не учитывается. Одна из причин создавшегося положения - практически полное отсутствие математических моделей, адекватно описывающих физические процессы в ЭСРН с различной природой нелинейности.

Таким образом, в научно-технической области, связанной с исследованиями, разработкой и применением ЭСРН, возникло следующее противоречие. С одной стороны, повысились потенциальные возможности РЭС за счет применения ЭСРН (возросло число задач, решаемых одновременно, улучшились их технические характеристики и т.д.). С другой стороны, эти потенциальные возможности реализованы не в полной мере вследствие заметного отставания от потребностей практики уровня развития методов проектирования ЭСРН, учитывающих влияние нелинейных эффектов.

Указанное противоречие лежит в основе одной из актуальных проблем радиофизики. Она состоит в необходимости создания теории ЭСРН, позволяющей с единых позиций проводить анализ ЭСРН независимо от их типа как в установленном, так и в неустановившемся режимах.

Одним из возможных направлений разрешения указанной проблемы является развитие теории ЭСРН на базе предложенного в [11] метода интегральных уравнений с нелинейными граничными условиями. По сути, в [11] описан исходный аппарат анализа ЭСРН. Это важный, но недостаточный шаг в плане создания приемлемых на практике методов проектирования. На наш взгляд, первоочередному рассмотрению подлежит следующий круг вопросов:

- решение ряда ключевых электродинамических нелинейных задач, которые могут составить теоретическую базу проектирования ЭСРН;
- создание эффективных численных методов решения нелинейных интегральных уравнений для конкретных разновидностей ЭСРН;
- разработка библиотеки математических моделей, адекватно описывающих физические процессы, происходящие в ЭСРН с различными механизмами нелинейности;
- создание программных продуктов и проведение численных экспериментов в целях выяснения основных закономерностей, присущих электродинамическим структурам как с “чисто” распределенной нелинейностью, так и с интегрированными на полупроводниковой подложке сосредоточенными НЭ.

**Литература:** 1. *Коновальцев А.А., Омаров М.А., Пащенко Д.А., Шокало В.М.* Электродинамические структуры с распределенными нелинейными элементами. I // Радиоэлектроника и информатика. 2000. №2. С.17-21. 2. *Navaro J.A., Chang K.* Integrated Active Antennas and Spatial Power Combining. - New York: John Wiley & Sons, 1996. 368p. 3. *Jain F.C., Bansal R.* Monolithic Semiconductor Antennas for Millimeter Wave Si and GaAs Integrated Circuit Technologies// Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1985. Vol.6. N 2. P.141-147. 4. *Uehara K., Miyashita K., Natsume K.-I., Hatakeyama K., Mizuno K.* Lens-Coupled Imaging Arrays for the Millimeter and Submillimeter-Wave Regions// IEEE Trans. 1992. Vol. MTT-40, N5. P. 806-811. 5. *Koert P., Cha J.T.* Millimeter wave technology for space power beaming // IEEE Trans. 1992. Vol. MTT-40, N6. P. 1251-1258. 6. *Christodoulou C.G., Yin S., Kauffman J.F.* Effects of the Schottky Impedance of Wire Contact Points on the Reflection Properties of a Mesh// IEEE Trans. 1988. V.AP-36. N12. P. 1714-1721. 7. *Панов В.В., Саркисян А.П.* Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. № 10, 11, 12. С.3-11. 8. *Лучанинов А.И., Шифрин Я.С.* Антенны с нелинейными элементами//Глава X в кн: Справочник по антенной технике. Т. 1./Под ред. Л.Д. Бахраха и Е.Г. Зелкина. М.: Изд-во ИПРЖР, 1997. С. 207-235. 9. *Bratchikov A.N., Voskresensky D.I., Sadekov T.A.* Fiber-optic technology for antenna signal transmission and distribution: present state and perspectives// Proc. of 3rd Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine. 1999. P.3-10. 10. *Горбань А.М., Лонин Ю.Ф., Харченко И.Ф.* Передающая линия с нелинейными элементами при импульсном возбуждении // Матери-

алы 7-й Межд. Крымской микроволновой конф., Севастополь, Украина. 1997. С.237-238. 11. *Шифрин Я.С., Лучанинов А.И.* Современное состояние теории и техники антенн с нелинейными элементами// Радиоэлектроника. 1996. Т. 39, № 9-10. С.4-16.

Поступила в редколлегию 14.04.2000

**Рецензент:** д-р. физ.-мат. наук, проф. Гордиенко Ю.Е.

**Коновальцев Андрей Алексеевич**, канд. техн. наук, докторант кафедры основ радиотехники ХТУРЭ. Научные интересы: антенны и устройства микроволновой техники, беспроводная передача энергии СВЧ лучом. Адрес: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. 40-94-30.

**Омаров Мурад Анверович**, канд. техн. наук, докторант кафедры основ радиотехники ХТУРЭ. Научные интересы: нелинейные эффекты в электродинамических структурах. Адрес: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. 40-94-30.

**Пащенко Дмитрий Александрович**, аспирант, кафедры основ радиотехники ХТУРЭ. Научные интересы: антенны, интегрированные с нелинейными элементами. Адрес: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. 40-94-30.

**Шокало Владимир Михайлович**, д-р. техн. наук, профессор, декан радиотехнического факультета ХТУРЭ. Научные интересы: информационные и энергетические радиоэлектронные системы КВЧ и ГВЧ диапазонов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. 40-94-78.

УДК 517.87; 537.958

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ИМПУЛЬСНЫМ ВОЗМУЩЕНИЕМ ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ

*СЛИПЧЕНКО Н.И., ШУЛЬГА Л.Н., РЫБИН О.Н.*

Рассматривается преобразование плоской монохроматической электромагнитной волны, вызванное изменением во времени диэлектрической и магнитной проницаемостей полуограниченной области в диэлектрическом пространстве. Получены выражения для компоненты электрического поля на всей положительной полуоси времени. Проводится детальный анализ эволюции электрического поля во времени.

### 1. Введение

Возможность полезного использования переходного излучения, как и необходимость учета его негативного влияния на распространение электромагнитных волн, требует рассмотрения причин возникновения этого излучения. Различные варианты таких причин рассмотрены в работе [1]. В качестве одной из них рассматривается изменение во времени электрических и магнитных свойств среды, обусловленное изменением диэлектрической и магнитной проницаемостей среды. В определенной спектральной области [2] изменение данных параметров во времени можно считать скачкообразным. Это обуславливает интерес к исследова-

нию влияния изменения во времени электрических и магнитных свойств в безграничных и полуограниченных областях на распространение электромагнитных волн аналитически [3-9].

В настоящей работе исследуется влияние импульсного синхронного изменения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(t)$  и магнитной проницаемости  $\mu(t)$  в области полупространства  $x \geq 0$  на прохождение плоской монохроматической электромагнитной волны в свободном диэлектрике. Считается, что до нулевого момента времени диэлектрическая среда была однородной и изотропной с диэлектрической и магнитной проницаемостями, соответственно,  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$ . Импульсы проницаемостей имеют прямоугольную форму и длительность  $\tau$ , так что в области  $x \geq 0$  изменение параметров среды описывается формулами

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(t) &= \varepsilon_0(\theta(-t) + \theta(t - \tau)) + \varepsilon_1(\theta(t) - \theta(t - \tau)), \\ \mu(t) &= \mu_0(\theta(-t) + \theta(t - \tau)) + \mu_1(\theta(t) - \theta(t - \tau)), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\mu_1$  — соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости области  $x \geq 0$  в возмущенном состоянии на интервале времени  $t \in (0, \tau)$ ;  $\theta(t)$  — единичная функция Хевисайда. Среда в области  $x < 0$  имеет диэлектрическую и магнитную проницаемости, соответственно,  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$ , для всех времен  $t \in (-\infty; \infty)$ .

Пусть первичное электрическое поле представляет собой ТМ волну с компонентой  $E_0(t, x)$ . Тогда