

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

УДК 621.373.5: 621.391.825

Влияние внешних электромагнитных полей СВЧ-диапазона на характеристики RC-генератора прямоугольных сигналов

*Д.А. Усанов¹, М.К. Мерданов², А.В. Скрипаль¹,
Р.В. Зотов², Б.Н. Коротин¹, Д.В. Пономарев¹*

¹*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», г.Саратов, Россия*

²*АО «НПО «Электронное приборостроение», г.Москва, Россия*

Influence of External Microwave Fields on Characteristics of Square-Wave RC-Generator

*D.A. Usanov¹, M.K. Merdanov², A.V. Skripal¹,
R.V. Zotov², B.N. Korotin¹, D.V. Ponomarev¹*

¹*Saratov National Research State University named after
N.G. Tchernishevsky, Saratov, Russia*

²*JSC «Research and production association «Electronic device
engineering», Moscow, Russia*

Исследовано влияние непрерывных электромагнитных полей СВЧ-диапазона среднего уровня мощности на характеристики RC-генератора прямоугольных сигналов с многоканальной буферной схемой развязки и схемой согласования. RC-генератор выполнен на инверторах серии 74НС14 со встроенным триггером Шмидта. Показано, что увеличение мощности воздействующего электромагнитного излучения приводит к уменьшению длительности импульсов и, следовательно, к увеличению частоты выходного сигнала RC-генератора. При этом чувствительность выходного сигнала RC-генератора к воздействию СВЧ-сигнала уменьшается как с увеличением напряжения питания, так и мощности СВЧ-сигнала. Установлено, что выходные характеристики цифровых радиоэлектронных систем оказываются наиболее чувствительными к воздействию СВЧ-сигнала при использовании полупроводниковых интегральных микросхем в качестве активных элементов и при выборе режимов работы микросхем по постоянному напряжению, значительно отличающемуся от номинального.

Ключевые слова: RC-генератор; полупроводниковые интегральные микросхемы; воздействие СВЧ-излучения.

The impact of continuous midrange power microwave fields on the characteristics of the square-wave *RC*-generator with the multi-channel buffer circuit and matching circuit, formed on the 74HC14 series inverters with the built-in Schmitt trigger, has been investigated. It has been shown that the increasing power of electromagnetic radiation reduces the pulse width and, hence, increases the frequency of the *RC*-generator output signal. The *RC*-generator output signal sensitivity to the impact of the microwave signal is decreased with an increase of both, the supply voltage and the microwave signal power. It has been concluded that the output characteristics of the digital radioelectronic systems are the most susceptible to the impact of the microwave signal while using the semiconductor integrated circuits, which are part of these systems, as the active elements and while choosing the operation modes of DC voltage circuits, significantly different from nominal ones.

Keywords: *RC*-generator; semiconductor integrated circuits; impact of microwave radiation.

Введение. На сегодняшний день особенностью развития радиолокационных систем является необходимость построения радиоэлектронных схем СВЧ-диапазона на основе полупроводниковой элементной базы, обеспечивающей надежную работу систем в условиях воздействия внешних электромагнитных полей. Проблема электромагнитной совместимости обостряется в связи с увеличением плотности компоновки радиоэлектронных схем при использовании современной полупроводниковой элементной базы. Воздействие СВЧ-излучения среднего уровня мощности на полупроводниковые приборы может приводить к качественному изменению вида их характеристик [1]. Следует учитывать, что поведение различных типов полупроводниковых приборов под действием СВЧ-излучения имеет свою специфику [2–5].

Одно из перспективных направлений в радиоэлектронике – переход от построения полупроводниковых радиоэлектронных схем, использующих аналоговые сигналы, к схемам, основанным на генерации, преобразовании и приеме цифровых сигналов [6, 7].

Известны исследования воздействия мощных сверхкоротких импульсно-периодических электромагнитных сигналов с несущей частотой 0,5 ГГц и длительностью от 40 мкс до 5 нс на цифровые радиоэлектронные системы, работающие с относительно низкочастотными сигналами. В работе [8] описан эффект воздействия импульсных электромагнитных помех на логические элементы микросхемы типа К561ЛЕ5 и 1554ЛЕ1, приводящий к изменению логического состояния элемента на время, равное или превышающее длительность воздействующего импульса.

В настоящей работе исследуется влияние воздействия непрерывных электромагнитных полей СВЧ-диапазона среднего уровня мощности на характеристики микросхемы цифровой электроники на примере *RC*-генератора прямоугольных сигналов с многоканальной буферной схемой развязки и схемой согласования. *RC*-генератор выполнен на инверторах серии 74HC14 со встроенным триггером Шмидта.

Описание экспериментальной установки. Для обеспечения стабильности выходного сигнала исследуемого *RC*-генератора использовались планарные металлопленочные чип-резисторы типа RK73 и термостабилизированные полипропиленовые конденсаторы типа FKP1, предназначенные для работы с импульсными сигналами. Принципиальная схема исследуемого *RC*-генератора приведена на рис. 1. Блок-схема измерительного стенда для исследования характеристик радиоэлектронных схем, работающих в режиме генерации и преобразования цифровых сигналов, при воздействии непрерывных электромагнитных полей представлена на рис. 2.

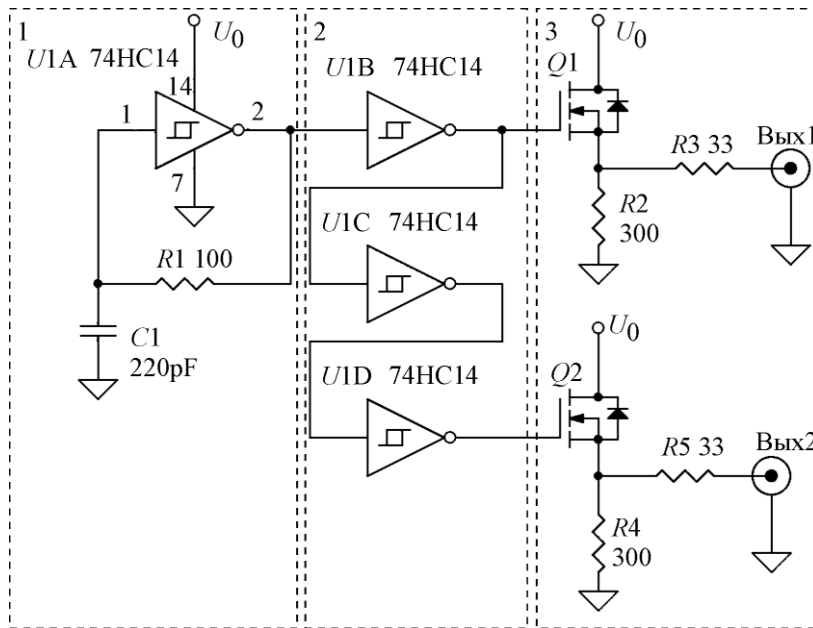


Рис.1. Принципиальная схема исследуемого RC-генератора (1) с многоканальной буферной схемой развязки (2) и схемой согласования (3)

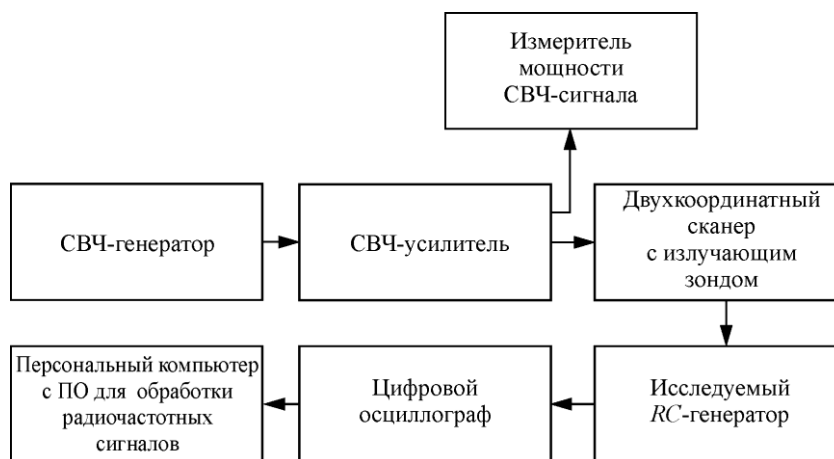


Рис.2. Блок-схема измерительного стенда

Источником СВЧ-сигнала служил генератор типа PSG Analog Signal Generator Agilent E8257D, предназначенный для работы в диапазоне частот 200,0 кГц– 40,0 ГГц. Для усиления выходного сигнала генератора применялся усилитель на полевом транзисторе с барьером Шоттки на основе GaAs. Уровень мощности усиленного сигнала контролировался измерителем мощности СВЧ-сигналов P-Series Power Meter типа Agilent N1911A. Выходной сигнал исследуемого RC-генератора прямоугольных сигналов контролировался цифровым осциллографом Tektronix TDS 2002 и обрабатывался на персональном компьютере с использованием программного обеспечения (ПО) в среде Mathcad. В качестве излучающей системы двухкоординатного сканера применялся излучающий зонд на основе коаксиально-волноводного перехода.

Результаты эксперимента. Исследовалось влияние СВЧ-сигнала среднего уровня мощности на работу RC-генератора прямоугольных сигналов с многоканальной буферной схемой развязки и схемой согласования на инверторах серии 74HC14 со встроен-

ным триггером Шмидта. Исследования проводились при различных режимах работы RC -генератора по постоянному напряжению и уровням мощности воздействующего СВЧ-сигнала. Частота СВЧ-сигнала выбиралась равной 8,0 ГГц из условия максимальной эффективности воздействия излучения используемого зонда на микросхему. Например, при частоте СВЧ-сигнала 10,0 ГГц эффект воздействия наблюдался, но величина сдвига частоты уменьшалась примерно в шесть раз.

Минимально допустимое напряжение постоянного питания микросхем серии 74НС14, согласно паспортным данным [9], составляет 2,0 В, а максимально допустимое – 6,0 В, поэтому представляет интерес исследование влияния внешнего СВЧ-сигнала на работу данного типа микросхем как при напряжении питания, близком к номинальному и равному 5,0 В, так и в режимах, значительно отличающихся от номинального.

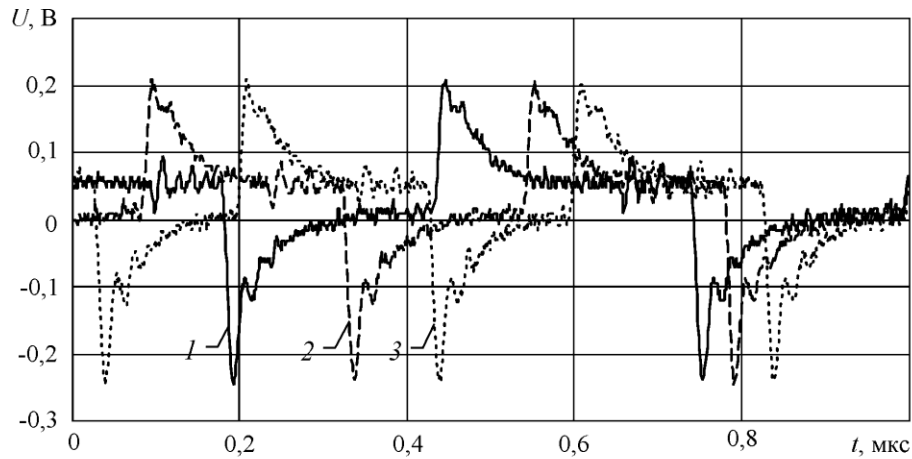
На рис.3 представлены временные зависимости выходных сигналов RC -генератора прямоугольных сигналов U_1 с многоканальной буферной схемой развязки и схемой согласования на инверторах серии 74НС14 со встроенным триггером Шмидта при различных уровнях мощности P воздействующего СВЧ-сигнала и различных напряжениях питания U_0 RC -генератора. Как следует из результатов, длительность импульсов RC -генератора определяется не только мощностью СВЧ-сигнала, но и в значительной мере режимом работы RC -генератора по постоянному напряжению.

На основе анализа временных характеристик выходного сигнала проведен расчет длительности импульсов τ_1 RC -генератора на выходе первого канала Вых1 (см. рис.1) в зависимости от уровня мощности воздействующего СВЧ-сигнала при различных напряжениях питания U_0 . Эксперименты показали, что увеличение постоянного напряжения питания и мощности внешнего СВЧ-сигнала вызывает уменьшение длительности выходных импульсов τ_1 RC -генератора. Например, воздействие СВЧ-сигнала с частотой 8,0 ГГц и мощностью 500,0 мВт при напряжении питания 2,0 В вызывает изменение τ_1 от 0,56 до 0,397 мкс, а уменьшение напряжения питания от 5,0 до 2,0 В вызывает увеличение изменения τ_1 от 0,008 до 0,163 мкс под действием СВЧ-сигнала мощностью 500 мВт, что соответствует относительному изменению τ_1 от 2,9 до 29 %. При выключении СВЧ-сигнала временные характеристики выходного сигнала принимали исходный вид.

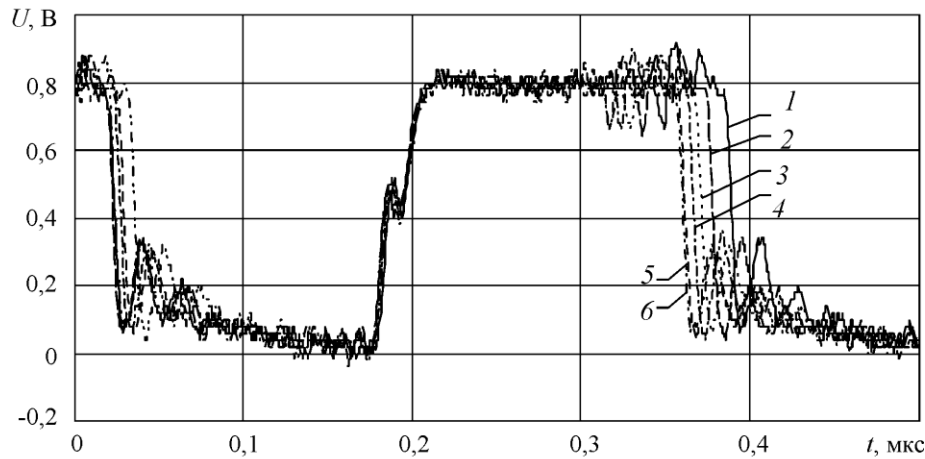
Наряду с уменьшением τ_1 при увеличении постоянного напряжения питания или увеличении мощности внешнего СВЧ-сигнала также происходит уменьшение чувствительности выходного сигнала RC -генератора к воздействию СВЧ-сигнала. Такое изменение выходных характеристик RC -генератора связано со смещением рабочей точки в область меньшей кривизны ВАХ нелинейных полупроводниковых элементов микросхемы 74НС14 как при увеличении мощности внешнего СВЧ-сигнала вследствие детекторного эффекта [1–5], так и при увеличении напряжения питания.

Анализ серии выходных импульсов RC -генератора позволяет рассчитать изменение частоты сигнала f на выходе первого канала под действием внешнего СВЧ-сигнала (рис.4,а).

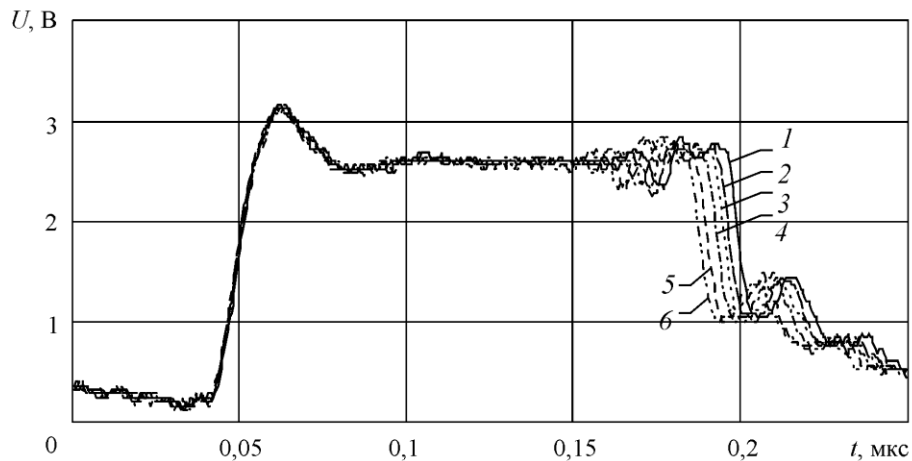
При напряжении питания 2,0 В воздействие СВЧ-сигнала на частоте 8,0 ГГц с мощностью 500,0 мВт приводит к изменению частоты выходного сигнала RC -генератора от 1,781 до 2,491 МГц, что составляет около 40 %. Увеличение напряжения питания до 5,0 В уменьшает чувствительность выходного сигнала RC -генератора к воздействию СВЧ-сигнала. Частота выходного сигнала при этом изменяется от 3,7025 до 3,993 МГц, что составляет ~7,8 %.



a



б



в

Рис.3. Временные зависимости выходного сигнала RC-генератора прямоугольных сигналов на инверторах серии 74НС14 со встроенным триггером Шмидта на выходе первого канала при различных уровнях мощности воздействующего СВЧ-сигнала: 1 – без воздействия СВЧ-сигнала, 2 – 200 мВт, 3 – 500 мВт, $U_0 = 2,0$ В (а); 1 – без воздействия СВЧ-сигнала, 2 – 100 мВт, 3 – 200 мВт, 4 – 300 мВт, 5 – 400 мВт, 6 – 500 мВт, $U_0 = 3,0$ В (б); 1 – без воздействия СВЧ-сигнала, 2 – 100 мВт, 3 – 200 мВт, 4 – 300 мВт, 5 – 400 мВт, 6 – 500 мВт, $U_0 = 5,0$ В (в). Частота внешнего СВЧ-сигнала 8,0 ГГц

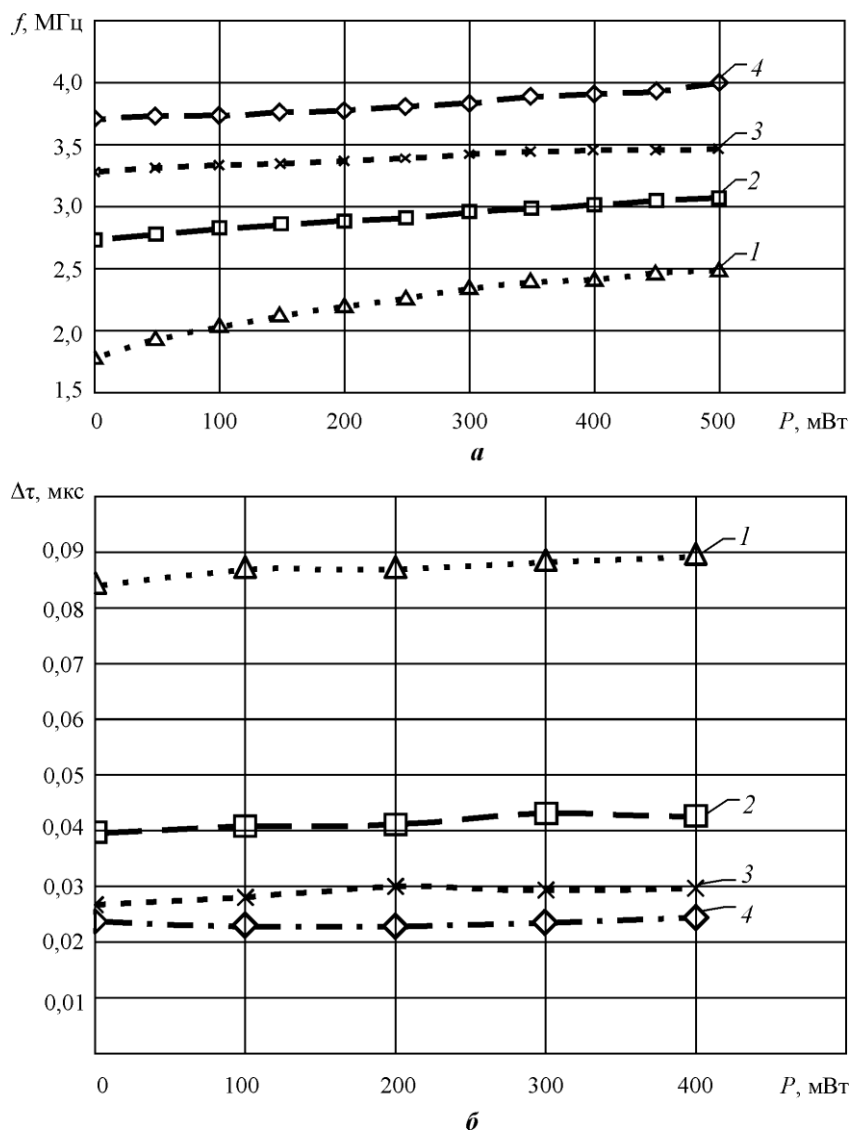


Рис.4. Зависимость частоты RC -генератора (a) и временного сдвига сигнала на выходе второго канала относительно первого (b) от мощности СВЧ-сигнала при различных напряжениях питания U_0 : 1 – 2,0 В; 2 – 3,0 В; 3 – 4,0 В; 4 – 5,0 В

Следует отметить, что 60 % изменения длительности импульсов RC -генератора под действием СВЧ-сигнала при напряжении питания 2,0 В достигается при мощности СВЧ-сигнала менее 200 мВт.

При создании RC -генератора прямоугольных сигналов с многоканальной буферной схемой развязки (см. рис. 1) и схемой согласования на инверторах серии 74НС14 со встроенным триггером Шмидта возникает необходимость определения временного сдвига сигнала Δt между выходными сигналами этих каналов и исследования его зависимости от напряжения питания и мощности внешнего СВЧ-сигнала (рис.4, b). Временной сдвиг сигнала Δt на выходе второго канала Вых2 относительно первого Вых1 (см. рис.1) определяется временем прохождения сигнала RC -генератора через два последовательно соединенных инвертора со встроенными триггерами Шмидта и состав-

ляет 0,0296 мкс при напряжении питания 4,5 В. Это соответствует паспортным данным на микросхему 74НС14. Как следует из результатов, приведенных на рис.4,б, временной сдвиг сигнала на выходе второго канала относительно первого увеличивается с уменьшением напряжения питания. Однако воздействие СВЧ-сигнала с мощностью до 400 мВт на временной сдвиг незначительно, что свидетельствует о слабом влиянии СВЧ-сигнала на работу инверторов серии 74НС14 со встроенным триггером Шмидта в пассивном режиме.

Заключение. Установлено, что при использовании цифровых электронных схем, работающих в условиях воздействия внешних электромагнитных полей, может наблюдаться изменение их частотных характеристик. Это изменение обусловлено зависимостью стационарных характеристик полупроводниковых элементов, входящих в состав микросхем, от уровня мощности СВЧ-сигнала. Чувствительность выходных характеристик цифровых электронных схем к изменению уровня мощности СВЧ-сигнала определяется их режимом работы. При использовании инвертора серии 74НС14 со встроенным триггером Шмидта в качестве активного элемента RC-генератора прямоугольных сигналов воздействие электромагнитного излучения уменьшает длительность импульсов и, следовательно, увеличивает частоту выходного сигнала. Чувствительность выходного сигнала RC-генератора к воздействию СВЧ-сигнала уменьшается как с увеличением напряжения питания, так и мощности СВЧ-сигнала. В процессе работы инверторов серии 74НС14 со встроенным триггером Шмидта в пассивном режиме, например при реализации буферной схемы развязки, воздействие электромагнитного излучения на его выходные характеристики незначительно.

Таким образом, для создания цифровых высокочастотных радиоэлектронных схем с повышенным уровнем надежности и помехозащищенности в условиях применения систем радиоэлектронного противодействия возникает необходимость использования внешних экранирующих устройств для полупроводниковых интегральных микросхем, работающих в активном режиме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (государственное задание № 1376 и 1575).

Литература

1. **Усанов Д.А., Скрипаль А.В.** Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1999. – 376 с.
2. **Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Угрюмова Н.В.** Возникновение отрицательного дифференциального сопротивления в диодных структурах на основе $p-n$ -перехода при воздействии СВЧ-излучения // ФТП. – 1998. – №11. – С. 1399–1402.
3. **Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Угрюмова Н.В.** Возникновение S-образных участков на вольтамперных характеристиках диодов с $p-n$ -переходом под действием СВЧ-излучения // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т.25. – №1. – С. 42–45.
4. Возникновение режима отрицательного дифференциального сопротивления и переключения в туннельном диоде под действием внешнего СВЧ-сигнала / **Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова и др.** // ФТП. – 2000. – Т. 34. – Вып. 5. – С. 567–571.
5. **Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Клецов А.А.** Нелинейность частотных характеристик полевого транзистора с барьером Шотки в режиме большого сигнала // Изв. вузов. Электроника. – 2003. – №5. – С. 50–56.
6. **Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А.** Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы. – М.: Радиотехника, 2013. – 208 с.
7. **Ильчук А.Р., Криштопов А.В., Романенков А.А., Татарский Б.Г.** Перспективы направления развития радиолокационных систем управления воздушным движением // Радиотехника. – 2013. – № 1. – С. 42–48.

8. Акбашев Б.Б., Еряшев Д.И., Корнев А.Н. Механизм деструктивного воздействия мощных сверхширокополосных импульсов на радиоэлектронные системы // Технологии ЭМС. – 2011. – №2 (37). – С. 19–23.

9. MM74HC14 Hex Inverting Schmitt Trigger. 2008. –
URL: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/MM/MM74HC14.pdf> (дата обращения 02.06.2016 г.).

Статья поступила
15 июня 2016 г.

Усанов Дмитрий Александрович – профессор, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), г. Саратов, Россия. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и нанoeлектроника, радиофизика, СВЧ-электроника.

Мерданов Мердан Казимагомедович – кандидат технических наук, генеральный директор – генеральный конструктор АО «НПО «Электронное приборостроение», г. Москва, Россия. *Область научных интересов:* технологии разработки и производства радарных и информационных систем.

Скрипаль Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела СГУ, г. Саратов, Россия. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и нанoeлектроника, радиофизика.
E-mail: SkripalA_V@info.sgu.ru

Зотов Роман Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора АО «НПО «Электронное приборостроение», г. Москва, Россия. *Область научных интересов:* технологии разработки и производства радарных и информационных систем.

Коротин Борис Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры физики твердого тела СГУ, г. Саратов, Россия. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и нанoeлектроника, микросхемотехника, СВЧ-электроника.

Пономарев Денис Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела СГУ, г. Саратов, Россия. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и нанoeлектроника, СВЧ-электроника, радиофизика.

**Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

Оформить годовую подписку на электронную
копию журнала можно на сайтах

- Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»»: www.rucont.ru; www.akc.ru;
www.pressa-rf.ru
- Урал-Пресс: www.delpress.ru