

УДК 621.382.029.6.001.63; 621.396.6.019.3; 620.3

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАДИОСИГНАЛОВ НА БАЗЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ НАНОДИОДОВ

Н.А. Ветрова, Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, В.В. Назаров,
В.Ю. Синякин, И.А. Федоренко, Н.В. Федоркова, В.Д. Шашурин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: vetrova@bmstu.ru; meschkov@bmstu.ru; shashurin@bmstu.ru

Рассмотрена перспектива улучшения функциональных характеристик радиоприемных устройств различного назначения путем совершенствования входящих в их состав нелинейных преобразователей радиосигналов. Показана перспективность нелинейных преобразователей радиосигналов на базе резонансно-туннельных диодов.

Ключевые слова: многослойные наноразмерные полупроводниковые гетероструктуры A_3B_5 , резонансно-туннельный диод, смеситель радиосигналов, выпрямитель СВЧ сигнала, системы радиочастотной идентификации.

PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF NONLINEAR RADIO SIGNAL CONVERTERS BASED ON RESONANT-TUNNELING NANODIODES

N.A. Vetrova, Yu.A. Ivanov, S.A. Meshkov, V.V. Nazarov,
V.Yu. Sinyakin, I.A. Fedorenko, N.V. Fedorkova, V.D. Shashurin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

e-mail: vetrova@bmstu.ru; meschkov@bmstu.ru; shashurin@bmstu.ru

A prospect is considered to improve functional characteristics of different-purpose radio-receiving devices by means of refining the nonlinear radio signal converters included in them. The development of nonlinear radio signal converters based on resonant tunneling nanodiodes is shown to be promising.

Keywords: multilayer nanodimensional semiconductor heterostructure A_3B_5 , resonant tunneling diode, radio signal mixer, microwave signal rectifier, radio frequency identification systems.

Развитие отечественной радиоэлектроники немислимо без освоения новой элементной базы, в частности наноэлектронной. С этой точки зрения перспективным является резонансно-туннельный диод (РТД) на базе многослойных наноразмерных полупроводниковых гетероструктур A_3B_5 . Он функционирует на основе квантоворазмерного эффекта резонансного туннелирования электронов поперек слоев гетероструктуры. Наномасштаб заложен в толщине слоев плоскости, в плане размеры РТД лежат обычно в микрометровом диапазоне и формируются при помощи традиционных фотолитографических процессов. Технология и оборудование для производства РТД существуют

и в России. Такие РТД функционирует в типичном для технических приложений диапазоне температур и других внешних воздействий.

Изменяя параметры слоев гетероструктуры (толщину, химический состав), можно управлять формой ВАХ и создавать диод с оптимальной для конкретного вида нелинейного преобразования формой ВАХ. Набор возможных нелинейных преобразований с применением РТД очень широк: генерация радиосигналов, частотная модуляция, смешивание радиосигналов, амплитудное детектирование, выпрямление, генерация сетки частотных меток и др.

В настоящей статье рассматриваются результаты исследований, направленных на улучшение показателей качества радиоэлектронных средств (РЭС) за счет применения РТД в нелинейных преобразователях: уменьшение искажений сигналов при увеличении рабочих частот, расширение полосы частот и динамического диапазона обрабатываемых сигналов, улучшение экологичности. Рассматривается применение РТД во входном функциональном узле радиоприемника – в смесителе радиосигналов и в блоке питания пассивной метки системы радиочастотной идентификации (РЧИД).

Применение РТД в нелинейных преобразователях радиосигналов исследуется, в частности, в работах [1–12]. Темой исследования работ [13–21] являются физические процессы в гетероструктуре РТД и построение их моделей. Вопросам стойкости к внешним воздействиям и надежности РТД посвящены работы [22–24]. Конструкции РТД, использованных в настоящей работе, отражены в патентах [25–31].

Улучшение показателей качества смесителей радиосигналов. Характеристики смесителя в супергетеродинных приемниках вносят основной вклад в чувствительность, помехоустойчивость и искажения обрабатываемых радиоприемником сигналов. Чувствительность зависит от шумов преобразования и шумов нелинейного элемента (диода), искажения обрабатываемых сигналов — от ширины динамического диапазона смесителя.

Одним из наиболее важных в рассматриваемом контексте свойств РТД является возможность получения оптимальной для данного нелинейного преобразования формы ВАХ. При смешивании радиосигналов в результате преобразования на выходе смесителя, кроме полезной составляющей, возникает множество продуктов комбинационного взаимодействия, уровень которых зависит от вида ВАХ преобразующих элементов, схемотехнического решения, числа входных сигналов и соотношения их частот и амплитуд.

К основным характеристикам смесителя СВЧ относятся [32]: потери преобразования (L), коэффициент стоячей волны (КСВ), точка 1 дБ компрессии (P_1), точка пересечения продуктов интермодуляции третьего порядка (IP_3), коэффициент шума.

Одним из основных параметров, определяющих динамический диапазон обрабатываемых смесителем радиосигналов и стойкость к блокированию мощной помехой, является уровень 1 дБ компрессии P_1 , приведенный к входу смесителя. Известно, что компрессия сигнала наблюдается при мощности сигнала P_c в пределах $0,1 \dots 0,5$ мощности гетеродина P_r . Следовательно, для увеличения динамического диапазона по уровню компрессии нужно увеличивать мощность гетеродина, подаваемую на смеситель.

Известно, что для диодов с барьером Шотки (ДБШ) оптимальная с точки зрения согласования, потерь преобразования и шумовых параметров мощность гетеродина составляет единицы микроватт/диод.

Используется множество балансных схем смесителей, основанных на соединении диодов кольцом или звездой. Двойные и тройные балансные схемы позволяют увеличить P_r в смесителях на ДБШ до 100 мВт и более. Также для увеличения мощности гетеродина применяется последовательное либо параллельное соединение нескольких диодов. Недостатком таких схем является необходимость подбора диодов с идентичными параметрами и применения сложных симметрирующих устройств с высокими требованиями к равномерности деления мощностей сигнала и гетеродина. Практическая реализация симметрирующих устройств в диапазоне СВЧ сопряжена с применением сложных схем с частотно-зависимыми элементами. Это приводит к сужению рабочего диапазона частот смесителя и ограничению полосы частот обрабатываемых сигналов. В диапазоне миллиметровых волн ввиду конструктивных ограничений возможна реализация смесителей лишь на базе одного либо двух диодов.

Применение РТД позволяет увеличить диапазон мощности гетеродина от $P_r \approx 0,5$ мВт/диод (и менее) до $P_r \approx 30$ мВт/диод (и более) в однодиодных и балансных смесителях и исключить необходимость подбора диодов в пары.

Преимущества применения РТД в смесителях радиосигналов целесообразно исследовать путем сопоставления характеристик смесителей на базе РТД и традиционных ДБШ.

С увеличением частоты более 1 ГГц начинают проявляться паразитные конструктивные параметры диодов (емкость корпуса, индуктивность выводов). Для наиболее полного исследования частотного спектра сигнала на выходе преобразователя необходимо, чтобы эти параметры не оказывали значительного влияния на частотах, соответствующих 8–12-й гармоникам входных сигналов. Поэтому в целях объективной оценки смесительных свойств РТД применена методика сопоставления характеристик смесителей на базе РТД и ДБШ в двух частотных диапазонах: на частотах порядка 100 МГц и 10 ГГц.

Параметры однодиодных смесителей на РТД и ДБШ на частотах вблизи 100 МГц. В составе смесителей, работающих на основной гармонике гетеродина и на удвоенной гармонике (субгармонические смесители — СГС), были использованы РТД с разными формами ВАХ и ДБШ 2А130. Их ВАХ приведены на рис. 1.

Смеситель на основной гармонике гетеродина. В смесителе на основной гармонике были выбраны частоты: гетеродина 110 МГц, сигнала $f_1 = 106,5$ МГц или $f_2 = 107$ МГц, промежуточная частота (ПЧ) 3,5 или 3 МГц соответственно. Мощность гетеродина изменялась в пределах от 0 до 40 мВт (от 0 до 16 дБм), мощность сигнала — в диапазоне 1 мкВт... 10 мВт (-30... 10 дБм). Были измерены зависимости потерь преобразования и значения IP_3 от мощности гетеродина для трех различных нелинейных элементов — РТД₁, РТД₂, ДБШ. Напряжение смещения выбиралось в интервале от 0 до 2 В, при этом ток смещения не превышал 10 мА для ДБШ и 30 мА для РТД. На рис. 2 приведены измеренные зависимости потерь преобразования РТД и ДБШ при разных значениях напряжения смещения.

На рис. 3 приведены зависимости значения IP_3 смесителей от мощности гетеродина. При измерении IP_3 значение напряжения смещения выбиралось таким же, как и при измерении потерь преобразования. Измерялась мощность составляющих третьего порядка с частотами

Напряжение, В

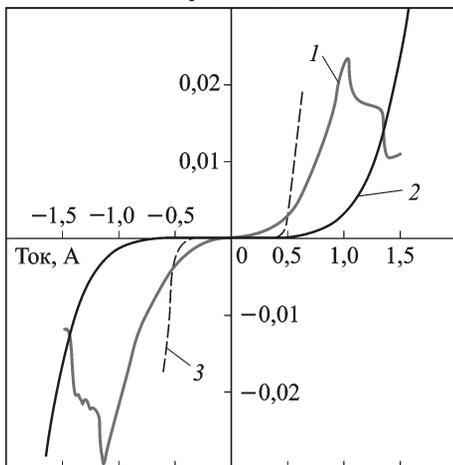


Рис. 1. ВАХ диодов РТД₁ (1), РТД₂ (2) и ДБШ 2А130 (3)

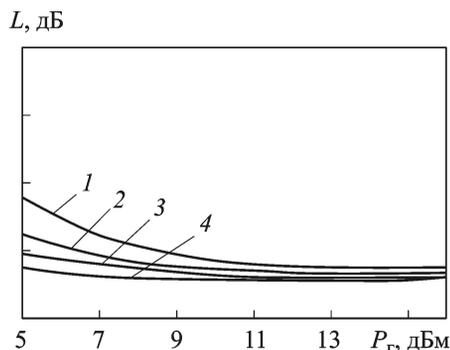
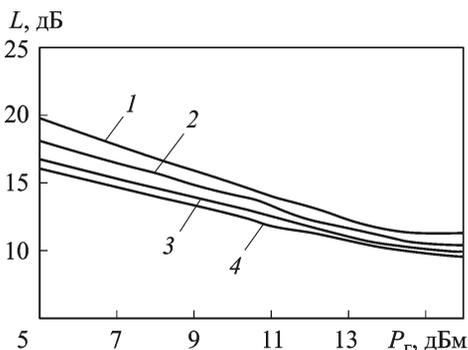


Рис. 2. Зависимость потерь преобразования от мощности гетеродина для РТД (а) и ДБШ (б) при различных значениях напряжения смещения: а — кривая 1 — 0,7 В; 2 — 0,8 В; 3 — 0,9 В; 4 — 1 В; б — кривая 1 — 0; 2 — 0,1 В; 3 — 0,2 В; 4 — 0,3 В

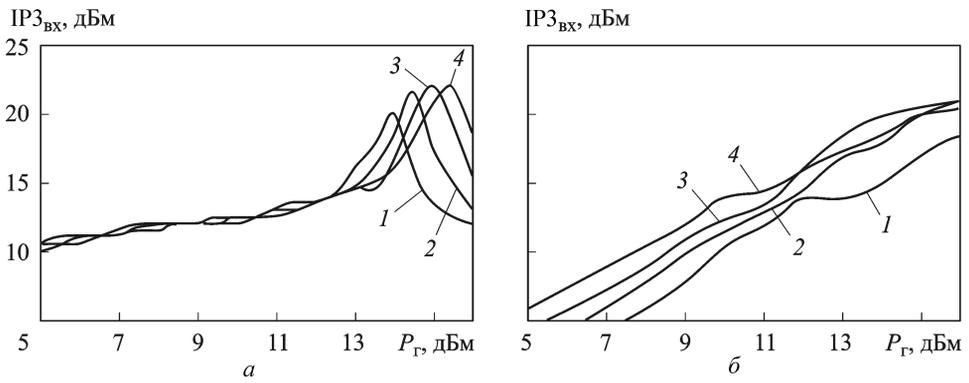


Рис. 3. Зависимость значения IP3 от мощности гетеродина для РТД₁ (а) и ДБШ (б) при различных напряжениях смещения (кривые 1... 4 – см. рис. 2)

$2f_1 - f_2 = 106$ МГц и $2f_2 - f_1 = 107,5$ МГц. Точка пересечения IP3 рассчитывалась по формуле

$$IP3 = (P_{\text{порядка}} + 18)/2, \quad (1)$$

где $P_{\text{порядка}}$ — мощность составляющей третьего порядка, измеренная при мощности входного сигнала 14 дБм.

Значение IP3 смесителя на ДБШ монотонно растет при увеличении мощности гетеродина и напряжения смещения, тогда как в смесителях на базе РТД изменение IP3 имеет немонотонный характер. При этом можно подобрать такие напряжение смещения и форму ВАХ РТД, при которых значение IP3 будет на 5–10 дБм выше, чем у смесителя на ДБШ при той же мощности гетеродина.

Субгармонический смеситель. В СГС частота гетеродина составляла 55 МГц, частоты сигналов $f_1 = 106,5$ МГц и $f_2 = 107$ МГц, промежуточные частоты $f_{\text{пр}} = 3$ и 3,5 МГц соответственно. Для определения IP3 использовались составляющие $2f_1 - f_2 = 106$ МГц и $2f_2 - f_1 = 107,5$ МГц. Мощность гетеродина изменялась в пределах от 0 до 40 мВт (от 0 до 16 дБм), мощности сигналов — в диапазоне 1 мкВт... 10 мВт (–30... 10 дБм). Были измерены зависимости потерь преобразования и значения IP3 от мощности гетеродина для трех упомянутых нелинейных элементов.

Измеренные значения потерь преобразования в зависимости от мощности гетеродина для СГС на базе РТД и ДБШ приведены на рис. 4, а. Видно, что минимальные потери преобразования для РТД с разными формами ВАХ достигаются при различных значениях мощности гетеродина, причем для РТД эта мощность может быть как меньше, так и значительно больше, чем для ДБШ. Абсолютное значение минимума потерь преобразования для РТД в значительной степени зависит от формы ВАХ, определяемой конструктивно-технологическими параметрами гетероструктуры РТД, а также пло-

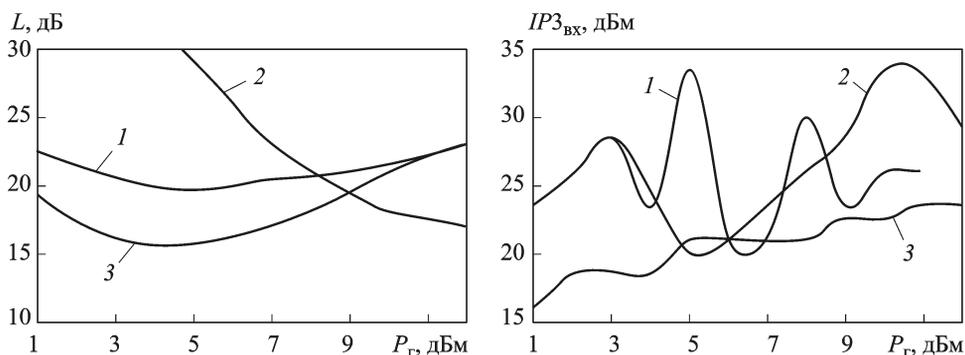


Рис. 4. Измеренные зависимости потерь преобразования СГС (а) и значения $IP3_{вх}$ СГС (б) от мощности гетеродина для РТД₁ (1), РТД₂ (2) и ДБШ (3) при встречно-параллельном включении

щадью диода. При этом минимальные потери смесителя на базе РТД сопоставимы с потерями преобразования смесителя на базе ДБШ.

Для оценки интермодуляционных искажений сигнала в смесителях на базе РТД и ДБШ были измерены зависимости точки пересечения третьего порядка по входу ($IP3_{вх}$) от мощности гетеродина (рис. 4, б).

Значение $IP3_{вх}$ монотонно растет с увеличением мощности гетеродина для смесителя на базе ДБШ, тогда как для смесителя на базе РТД имеет несколько локальных максимумов. Поэтому применение РТД позволяет при управлении в небольших пределах мощностью гетеродина увеличить значение $IP3$ на 10...12 дБм по сравнению с ДБШ. При этом наибольшее преимущество имеют РТД с повышенной мощностью гетеродина. Это открывает перспективу для разработки смесителей на РТД с высоким уровнем $IP3$ без применения сложных схем с большим числом диодов.

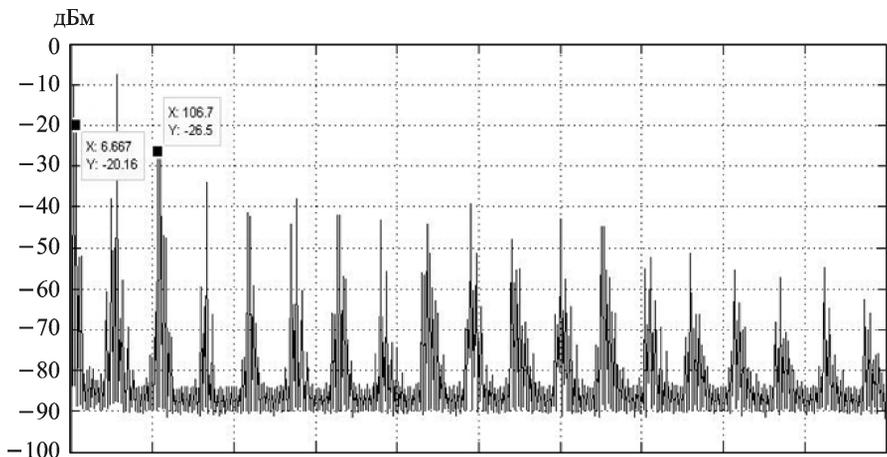
На рис. 5 показаны измеренные спектры в диапазоне до 1 ГГц выходного сигнала СГС на базе РТД и ДБШ при мощности гетеродина 10 мВт и мощности сигнала 100 мкВт.

Из рис. 5 следует, что мощность высших гармоник и комбинационных составляющих в спектре выходного сигнала СГС на базе РТД значительно (на 20...80 дБм) меньше, чем у такого же СГС на ДБШ.

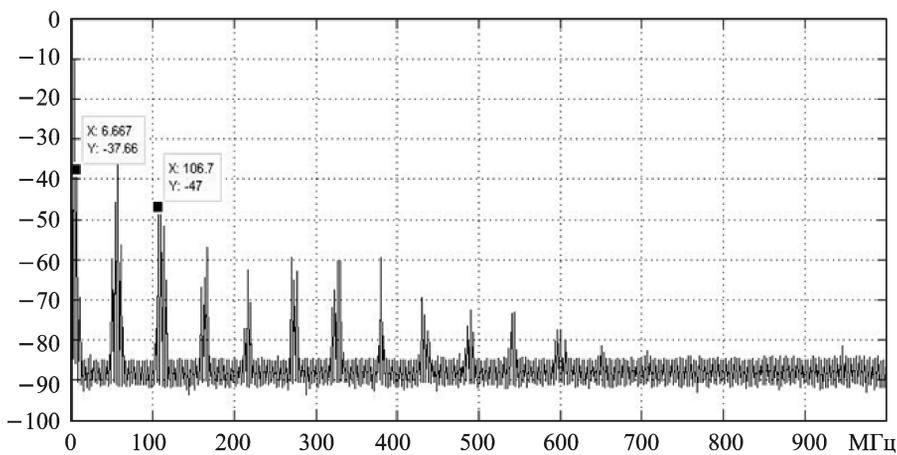
На рис. 6 приведен спектр выходного сигнала при измерении мощности интермодуляционных составляющих третьего порядка СГС на базе РТД и ДБШ. Мощность гетеродина 4 мВт на смеситель (~1 мВт на диод) при мощности сигнала 100 мкВт.

В спектре выходного сигнала СГС на РТД комбинационные составляющие высших порядков с частотами, близкими к ПЧ, на 10...30 дБм меньше, чем составляющие с такими же частотами в спектре СГС на ДБШ.

Измерение параметров СВЧ смесителя на РТД и ДБШ. Балансный смеситель диапазона 8...12 ГГц на базе микрополосковых



a



б

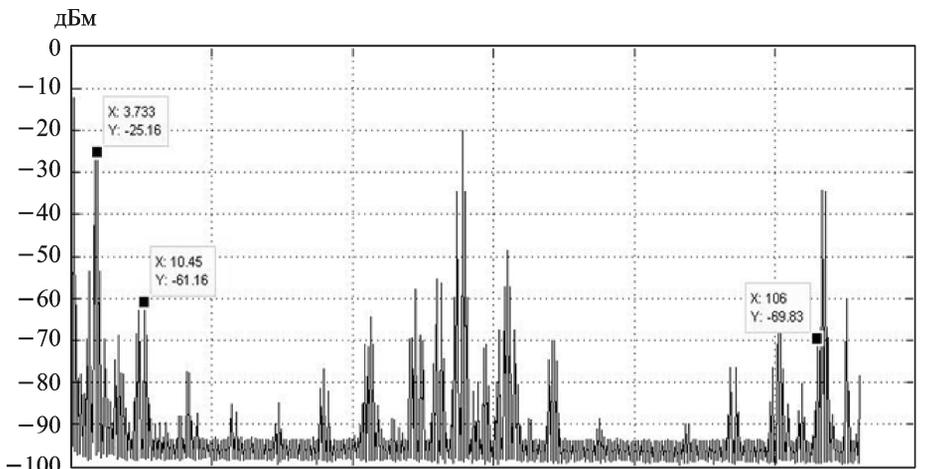
Рис. 5. Спектр в диапазоне до 1 ГГц выходного сигнала СГС на ДБШ (*a*) и на РТД₂ (*б*)

и щелевых линий передачи собран на микрополосковой плате. Сигнал гетеродина подается на диоды в противофазе через щелевую линию. Входной сигнал поступает синфазно через полосовой фильтр. Промежуточная частота снимается через фильтр низких частот (ФНЧ).

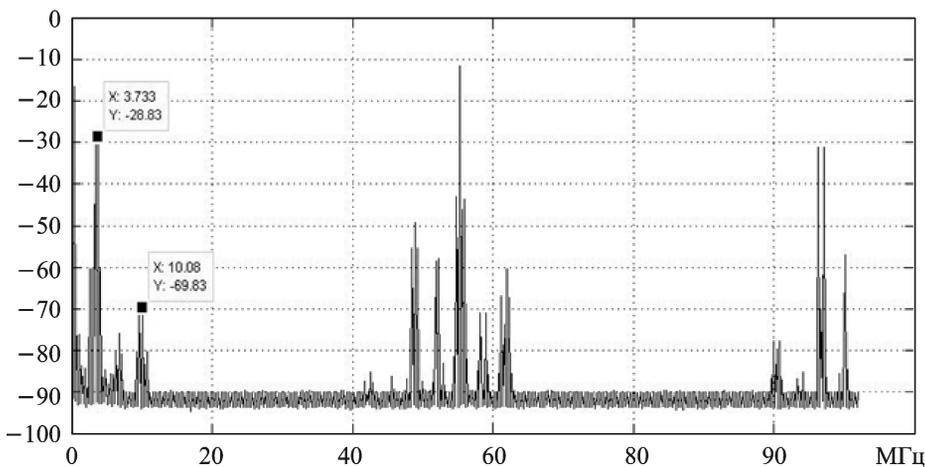
В смесителе на базе РТД на диод подавалось постоянное напряжение смещения, значение которого подбиралось из условия достижения минимальных потерь преобразования. Характеристики смесителей на РТД и ДБШ приведены в таблице.

При оптимальных значениях мощности гетеродина и напряжения смещения смеситель на РТД обеспечивает сравнимые со смесителем на ДБШ потери преобразования при существенном расширении динамического диапазона (значения ИРЗ).

В результате анализа спектров выходного сигнала смесителей на РТД и ДБШ выявили, что при оптимальной мощности гетеродина ам-



a



б

Рис. 6. Спектр выходного сигнала СГС при измерении IP3 на ДБШ (*a*) и на РТД₂ (*б*)

плитуды спектральных составляющих высших порядков для смесителя на РТД уменьшаются с увеличением номера гармоники значительно быстрее, чем для смесителя на ДБШ. На основании полученных результатов и с учетом известных свойств операции смешивания радиосигналов можно сделать вывод об уменьшении влияния побочных каналов смесителя на базе РТД на характеристики приемника. Экспериментальные результаты подтверждают этот вывод. Спектральная плотность шума в полосе ПЧ смесителя на РТД составляет 130 дБм/Гц, на ДБШ она равна 124 дБм/Гц. Это обусловлено уменьшением шумов, преобразованных из побочных каналов приема на гармониках гетеродина и преобразованных шумов гетеродина. К тому же, как отмечено в работе [33], в РТД в отличие от ДБШ наблюдается депрессия дробового шума.

Характеристики смесителей на РТД и ДБШ

Мощность гетеродина, дБм	Потери преобразования, дБ		IP3, дБм	
	РТД	ДБШ	РТД	ДБШ
11	7,5	7,5	25	20
14	7	8	32	22

Применение смесителей данного типа актуально для оборудования миллиметрового диапазона.

Выводы по исследованиям применения РТД в смесителе радиосигналов. Важным преимуществом смесителей на базе РТД по сравнению с ДБШ является расширение динамического диапазона благодаря повышению параметра IP3, снижению шумов преобразования и шумов диода. Таким образом обеспечивается повышение чувствительности и помехоустойчивости приемника.

Использование РТД в качестве нелинейного элемента смесителя радиосигналов целесообразно, в первую очередь, в составе СГС.

Улучшение показателей качества выпрямителя СВЧ-сигнала. Рассмотрим применение РТД в выпрямителе СВЧ-сигнала. Перспективные системы, в которых применяется данный тип нелинейного преобразования — это системы РЧИД с пассивными метками. Они широко используются в логистике, торговле, на транспорте и т.д.

Пассивные метки не имеют автономного источника питания, при этом используется энергия зондирующего сигнала. В системах с пассивной меткой дальность определяется минимальной мощностью СВЧ сигнала считывателя на выходе антенны метки, необходимой выпрямителю для обеспечения питанием всех ее частей, и составляет от 1 до 10 м при мощности генератора считывателя 4 Вт [34]. Одной из задач при разработке таких систем является увеличение дальности действия, что позволит расширить область их применения. Этого можно достичь или путем увеличения мощности излучаемого сигнала (что не желательно из-за ухудшения электромагнитной совместимости и экологической обстановки в зоне действия системы), или путем повышения чувствительности метки. Она зависит от полной эффективности выпрямителя СВЧ-сигнала η_0 , которая определяется как отношение мощности P_{DC} , потребляемой чипом метки (мощность на выходе выпрямителя), к мощности СВЧ-сигнала на выходе антенны метки $P_{rfпад}$:

$$\eta_0 = P_{DC} / P_{rfпад}. \quad (2)$$

Эффективность преобразования выпрямителя η_c определяется отношением мощности P_{DC} , потребляемой чипом метки, к мощности СВЧ-сигнала на входе выпрямителя $P_{вх}$:

$$\eta_c = P_{DC} / P_{вх}. \quad (3)$$

Полная эффективность η_0 будет тем больше, чем меньше отраженная от границы антенна–выпрямитель мощность сигнала, т.е. чем лучше согласован выпрямитель с антенной.

Исследовалась возможность повышения эффективности преобразования η_c выпрямителя СВЧ-сигнала за счет использования в нем РТД с ВАХ, оптимальной для преобразования СВЧ-сигнала в постоянное напряжение. Такая ВАХ представляет собой кусочно-линейную кривую с изломом в начале координат. Аналитически ее описывает система двух уравнений

$$\begin{aligned} I(U) &= S_{\text{пр}}U, \quad \text{при } U > 0; \\ I(U) &= S_{\text{обр}}U, \quad \text{при } U \leq 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где U — напряжение на диоде; I — ток через диод; $S_{\text{пр}}$ и $S_{\text{обр}}$ — постоянные коэффициенты, характеризующие проводимость диода в прямом и обратном направлениях.

На рис. 7, а представлена схема выпрямителя с умножением амплитуды входного напряжения на 12, которая используется в современных пассивных метках РЧИД.

В качестве нелинейных элементов в ней применяются ДБШ. Эффективность преобразования η_c выпрямителя на ДБШ не превышает 50...60%. Как показали результаты исследования, ее можно повысить за счет применения в выпрямителе РТД с кусочно-линейной ВАХ, описываемой системой уравнений (4). Был выполнен расчет эффективности преобразования выпрямителя η_c в зависимости от мощности потребления метки (выходная мощность выпрямителя) P_{DC} при заданном выходном напряжении выпрямителя $U_{\text{вых}} = 1$ В. Расчет показывает, что в зависимости от потребляемой меткой мощности выигрыш

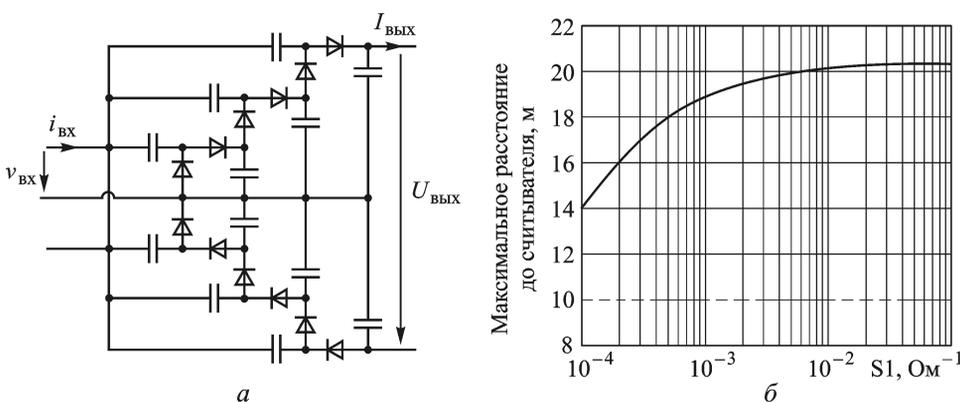


Рис. 7. Электрическая схема трехступенчатого двухполупериодного выпрямителя с 12-кратным умножением выходного напряжения (а), максимальное расстояние до считывателя в зависимости от крутизны прямой ветви ВАХ РТД при крутизне обратной ветви $S_2 = 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}$ для выпрямителей на основе РТД (сплошная кривая) и ДБШ (штриховая) (б)

в эффективности преобразования для выпрямителя на основе РТД с кусочно-линейной характеристикой по сравнению с выпрямителем на ДБШ составляет от 3 до 10 раз.

Как было отмечено, полная эффективность выпрямителя η_0 зависит не только от эффективности преобразования η_c , но и от значения КСВ на границе антенна–выпрямитель. Проведенные исследования показали, что, подбирая отношение $S_{пр}/S_{обр}$, можно управлять входным сопротивлением выпрямителя на основе диодов с кусочно-линейной ВАХ, тем самым обеспечивая наилучшее согласование выпрямителя с антенной.

Для иллюстрации указанного зададим значения выходного напряжения выпрямителя $U_n = 1$ В и выходного тока $I_n = 10$ мкА; в качестве антенны используется полуволновый петлевой вибратор с коэффициентом усиления $G = 2,15$ дБ и сопротивлением излучения $R_s = 292$ Ом; рабочая частота $f = 910$ МГц. На рис. 7, б приведены результаты расчета расстояния от считывателя до метки для различных значений наклона прямой ветви ВАХ РТД S_1 при постоянном значении $S_2 = 10^{-6}$ Ом $^{-1}$. Видно, что уже при отношении $S_1/S_2 = 10^2$ выигрыш в расстоянии системы беспроводного питания пассивной метки на основе РТД составляет почти 1,5 раза по сравнению с меткой на основе ДБШ. Отметим, что дальность действия системы тем больше, чем больше отношение S_1/S_2 .

Важным параметром выпрямителя является число ступеней умножения выходного напряжения. Коэффициент умножения определяется числом нелинейных элементов в выпрямителе. Оптимизировать конструкцию выпрямителя СВЧ сигнала можно, изменяя коэффициент умножения выходного напряжения выпрямителя, причем при увеличении числа нелинейных элементов обеспечивается согласование с более низкоомными антеннами.

Выводы по исследованиям применения РТД в выпрямителе СВЧ-сигнала. Применение РТД в выпрямителях СВЧ-сигнала систем РЧИД с пассивными метками позволяет увеличить в 1,5–2 раза дальность их действия по сравнению с аналогичными системами на основе ДБШ. При заданной дальности действия системы может быть снижена мощность излучателя, что важно для обеспечения электромагнитной совместимости и экологичности.

В выпрямителях СВЧ-сигнала на РТД проще согласовать входное сопротивление выпрямителя с выходным сопротивлением антенны за счет подбора коэффициента умножения выходного напряжения, что расширяет разнообразие конструктивных исполнений антенн пассивных меток.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Улучшение параметров смесителей радиосигналов за счет применения резонансно-туннельных диодов / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, И.А. Федоренко и др. // Техника и приборы СВЧ. – 2011. – № 2. – С. 1–9.
2. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов. Ч. 1 / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова и др. // Наноинженерия. – 2011. – № 1. – С. 34–44.
3. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов. Ч. 2 / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова и др. // Наноинженерия. – 2011. – № 2. – С. 93–95.
4. Алкеев Н. В. Анализ шумовых и динамических свойств субгармонического смесителя на резонансно-туннельном диоде // М.: Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, № 104. – С. 1258.
5. Малышев К. В. Разработка технологического метода повышения эксплуатационных показателей нелинейных преобразователей спектра радиосигналов путем применения AlGaAs гетероструктур: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 183 с.
6. Иванов Ю. А., Мешков С. А., Федоркова Н. В., Федоренко И. А. Интермодуляционные параметры субгармонического смесителя на базе резонансно-туннельного диода // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Тез. докл. 19-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2009. – С. 567–568.
7. Иванов Ю. А., Малышев К. В., Перунов Ю. М., Федоркова Н. В. Гармониковый смеситель СВЧ диапазона на РТД // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымКо 1998): Материалы 8-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 1998. – С. 590–591.
8. Иванов Ю. А., Малышев К. В., Перунов Ю. М., Федоркова Н. В. Нанодиод для смесителя // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымКо 2002) : Материалы 12-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2002. – С. 462–463.
9. Иванов Ю. А., Малышев К. В., Федоркова Н. В. Нанoeлектроника на базе многослойных гетероструктур // Изв. вузов. Машиностроение. – 2003. – № 5. – С. 73–78.
10. Иванов Ю. А., Федоркова Н. В., Шалаев В. А. Нанoeлектроника в СВЧ нелинейных преобразователях для радиолокации // Радиооптические технологии в приборостроении : Тез. докл. 1-й науч.-технич. конф. – Сочи, 2003. – С. 15–19.
11. Иванов Ю. А., Федоренко И. А., Федоркова Н. В. Анализ влияния формы ВАХ резонансно-туннельного нанодиода на параметры смесителя СВЧ диапазона // Вопросы инженерной нанотехнологии: Сб. докл. Междунар. конф. М., 2008. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
12. Иванов Ю. А., Мешков С. А., Попов И. И., Федоренко И. А. Повышение показателей качества назначения субгармонического смесителя радиосигналов за счет применения резонансно-туннельного диода // Сетевой электронный научный журнал “Системотехника”. – 2010. – № 8.
13. Иванов Ю. А., Малышев К. В., Перунов Ю. М. Численное моделирование смесителей на резонансно-туннельных диодах // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымКо 1998): Материалы 8-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 1998. – С. 597–598.

14. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломийцева Н. В. Исследование влияния границ раздела “сшивки” в комбинированной модели РТД // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымиКо 2006) : Материалы 16-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2006. – С. 667–668.
15. Прохоров Э. Д. Квантово-размерные эффекты в твердотельных сверхвысокочастотных приборах. – Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2005. – 220 с.
16. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломийцева Н. В. Комбинированная модель резонансно-туннельного диода // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. Вып. 9. – С. 1138–1145.
17. Бежко М. П., Безотосный И. Ю., Шмелев С. С. Особенности поведения дифференциальной проводимости резонансно-туннельных структур // Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии. VII Междунар. науч. конф. – Кисловодск, 2007. – С. 13–14.
18. Абрамов И. И., Королев А. В. Теоретическое исследование приборных структур, содержащих резонансно-туннельные диоды // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. Вып. 9. – С. 128–133.
19. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломийцева Н. В. Моделирование резонансно-туннельных структур с использованием комбинированных одно- и двухзонных физико-топологических моделей // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымиКо 2005): Материалы 15-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2005. – С. 617–618.
20. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломийцева Н. В. Моделирование РТД на основе GaAs/AlGaAs с использованием однозонной комбинированной модели // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымиКо 2006): Материалы 16-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2006. – С. 665–666.
21. Коломийцева Н. В. Моделирование резонансно-туннельных структур с использованием комбинированных одно- и двухзонных физико-топологических моделей // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымиКо 2005) : Материалы 15-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2005. – С. 617–618.
22. Yan Yang X u, Fay P., Chow D. H. Experimental investigation of the temperature dependence of InAs-AlSb-GaSb resonant interband tunnel diodes // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2004. – Vol. 51, Issue 7. – P. 1060–1064.
23. Elesin V. V., Maltcev P. P., Nikiforov A. Y. Radiation effects in resonance-tunnel diode structures // Third European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. – Arcashon (France), 1995. – P. 557–559.
24. Прогнозирование индивидуальной надежности гетероструктурного РТД и устройств на его основе / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, С.В. Хныкина и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2008): Материалы 18-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2008. – Т. 1. – С. 558–559.
25. П а т е н т на изобретение № 2372691. Нанoeлектронный полупроводниковый смесительный диод / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова и др. Приоритет изобретения 19.08.2008.
26. П а т е н т на изобретение № 2372692. Нанoeлектронный полупроводниковый смесительный диод / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова и др. Приоритет изобретения 19.08.2008.
27. П а т е н т на изобретение № 2372693. Нанoeлектронный полупроводниковый смесительный диод / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова и др. Приоритет изобретения 19.08.2008.
28. П а т е н т на изобретение № 2372694. Нанoeлектронный полупроводниковый смесительный диод / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова и др. Приоритет изобретения 19.08.2008.

29. П а т е н т на изобретение № 2412897. Нанoeлектронный полупроводниковый выпрямительный диод / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова и др. Приоритет изобретения 16.02.2010.
30. П а т е н т на изобретение № 2412898. Нанoeлектронный полупроводниковый выпрямительный диод / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова и др. Приоритет изобретения 16.02.2010.
31. П а т е н т на изобретение № 2415494. Нанoeлектронный полупроводниковый выпрямительный диод / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова и др. Приоритет изобретения 16.02.2010.
32. M a a s S. A. Nonlinear microwave circuits. – IEEE Press, New York. – 1997. – P. 114.
33. Р е з о н а н с н о-туннельный диод на основе гетеросистемы GaAs/AlAs для субгармонического смесителя / Н.В. Алкеев, С.И. Аверин, А.А. Дорофеев // Микроэлектроника. – 2010. – Т. 39, № 5. – С. 356–365.
34. C u r t y J. P. et al. Design and optimization of passive UHF RFID systems. – Springer, 2007.

Статья поступила в редакцию 18.04.2012