

11, ноябрь 2015

УДК 001.891.573

Исследование субгармонических смесителей радиосигналов на основе ДБШ и перспективы замены нелинейных элементов на РТД

Белькова Е.В., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,
Кафедра «Технологии приборостроения»*

Бельская А.Ю., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,
Кафедра «Технологии приборостроения»*

Научный руководитель: Мешков С.А., к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Кафедра «Технологии приборостроения»*

k_rl6@bmstu.ru

Актуальность исследования

В состав большинства РЭС входят в качестве функциональных модулей смесители радиосигналов. В зависимости от условий применения смесители должны удовлетворять определенным требованиям: низкие потери преобразования и шумы, большая полоса пропускания, не слишком высокая мощность гетеродина, широкий динамический диапазон по уровню 1 дБ компрессии $P_{-1дБ}$ и по уровню $IP3$ (точки пересечения интермодуляционных составляющих третьего порядка) P_{IP3} .

Процесс преобразования в смесителе осуществляется с помощью нелинейного элемента, как правило, диода с барьером Шоттки (ДБШ) с экспоненциальной вольтамперной характеристикой (ВАХ). Альтернативным решением является использование резонансно-туннельных диодов (РТД) на основе GaAsAl многослойных наноразмерных гетероструктур. ВАХ РТД имеет более пологую форму по сравнению с парой включенных встречно-параллельно ДБШ, позволяет уменьшить амплитуды паразитных составляющих и снизить уровень искажений сигналов, что способствует снижению паразитных составляющих на выходе смесителя.

Ход исследования

Вольтамперные характеристики ДБШ и двух резонансно-туннельных диодов на разных гетероструктурах (РТД 1 и РТД 2) измерялись на лабораторном стенде, в состав которого входят: ПЭВМ, источник питания с цифровым управлением «*Agilent 3640A DC Power Supply*», микрозондовая установка (МЗУ) «ЛОМО 900072». Вольтамперные характеристики РТД 1, РТД 2 и ДБШ показаны на рис. 1. ВАХ диодов рассматриваются до падающего участка.

Исследование характеристик смесителей проводилось в САПР ВЧ/СВЧ устройств *AWR Microwave Office*. Значения тока и напряжения для каждой ВАХ вводились в программу *Microwave Office*, в которой на основании этих данных моделировались характеристики смесителя.

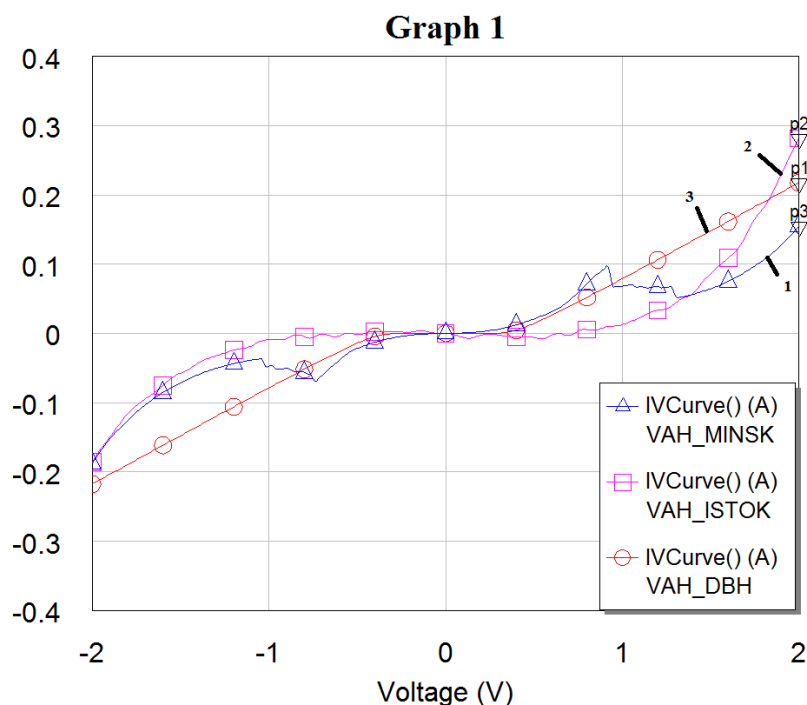


Рис. 1. Вольтамперные характеристики ДБШ, РТД 1 и РТД 2:

1 – ВАХ РТД 2, 2 – ВАХ РТД 1, 3–ВАХ двух включенных встречно-параллельно ДБШ

Схема электрическая принципиальная однодиодного субгармонического смесителя (СГСМ), используемая для моделирования в *AWR Microwave Office*, показана на рис. 2.

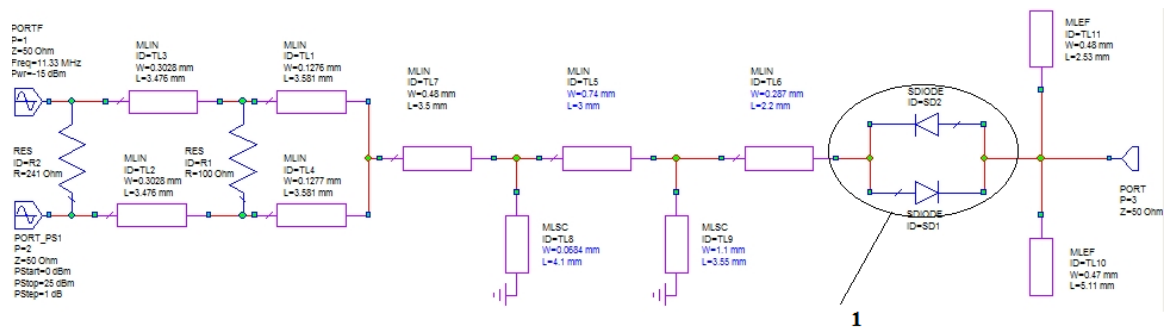


Рис. 2. Схема однодиодного субгармонического смесителя в программе AWR MWO:
1–эквивалентная модель ДБШ

Схема электрическая принципиальная субгармонического балансного смесителя, смоделированная в AWR Microwave Office, представлена на рис. 3.

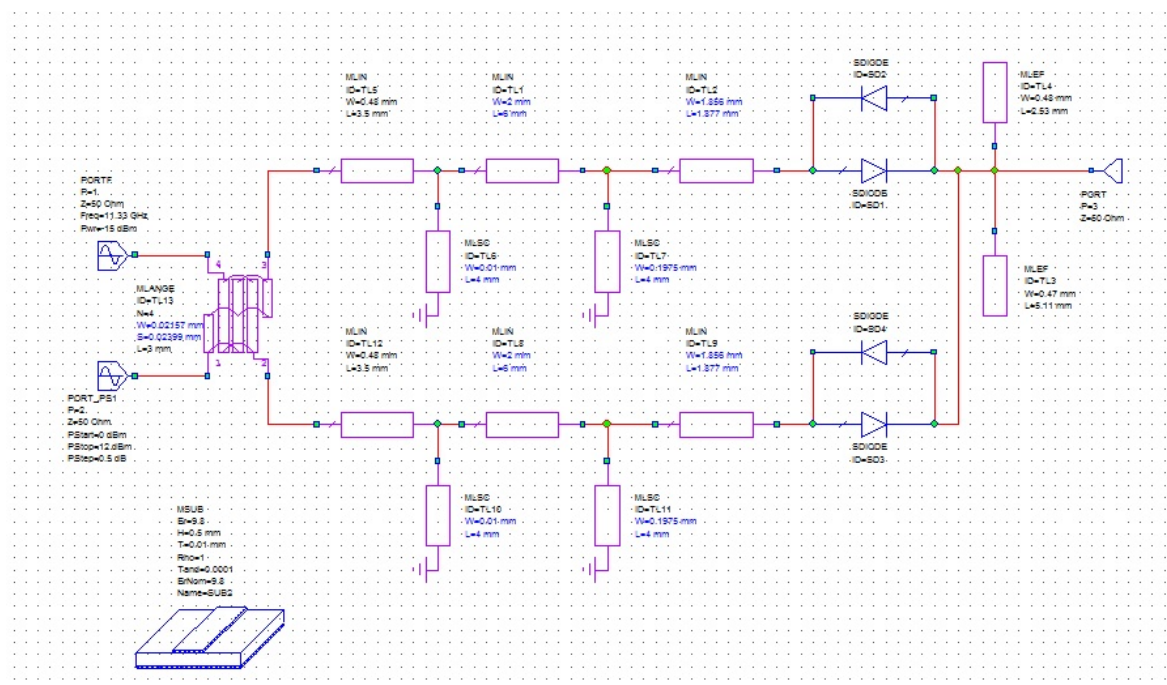


Рис. 3. Схема субгармонического балансного смесителя в программе AWR MWO

Выбранные параметры для моделирования смесителей приведены в таблице 1.

Параметры смесителей

№	Параметр	Значение	Единицы измерения
1	Частота сигнала, f_c	11,33	ГГц
2	Частота гетеродина, f_e	5,7	ГГц
3	Промежуточная частота, $f_{п.ч.}$	0,07	ГГц
4	Диэлектрическая проницаемость подложки, ϵ_r	9,8	-
5	Материал подложки	поликор	-
6	Толщина подложки, H	0,5	мм
7	Толщина металлизации, T	0,01	мм
8	Тангенс диэлектрических потерь, $Tand$	0,001	мм

Для оценки данных, полученных в результате проектирования, сравнивались рабочие параметры смесителей на базе ДБШ, РТД 1 и РТД 2. Структура схемы СГСМ (рис. 2 и рис. 3) остается неизменной, в качестве нелинейных элементов используются РТД 1, РТД 2 и ДБШ.

Верхняя граница динамического диапазона рассчитывается по точке 1 дБ компрессии и по точке пересечения интермодуляционных составляющих третьего порядка P_{IP3} . Нижняя граница динамического диапазона определяется шумами и в данной работе не рассматривается.

Моделирование характеристик однодиодного субгармонического смесителя показало, что при использовании РТД достигаются меньшие, чем при использовании ДБШ, потери преобразования и больший коэффициент передачи (рис. 4, 5). Аналогичные результаты были получены при моделировании характеристик субгармонического двухдиодного (балансного) смесителя (рис. 6, 7).

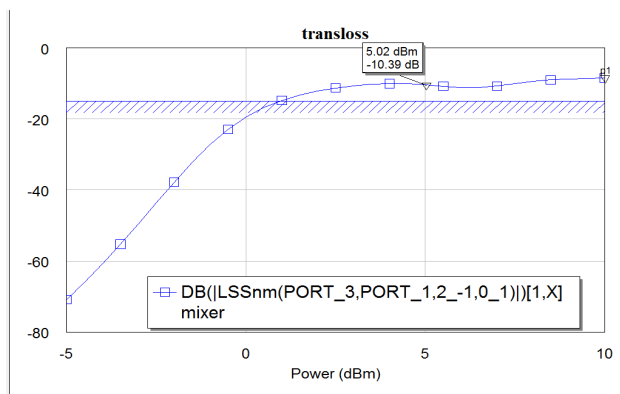


Рис. 4. Зависимость потерь преобразования от мощности гетеродина (однодиодный смеситель)

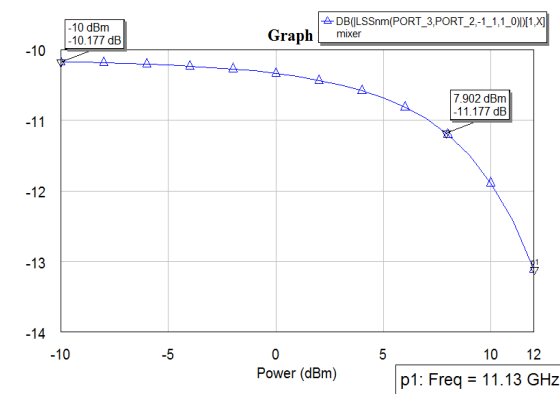


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи от мощности сигнала (однодиодный смеситель)

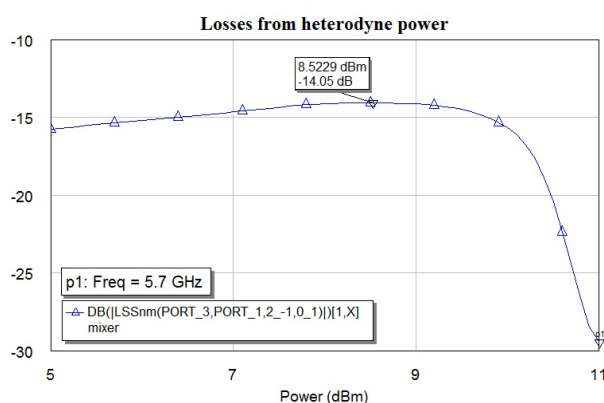


Рис. 6. Зависимость потерь преобразования от мощности гетеродина (двухдиодный смеситель)

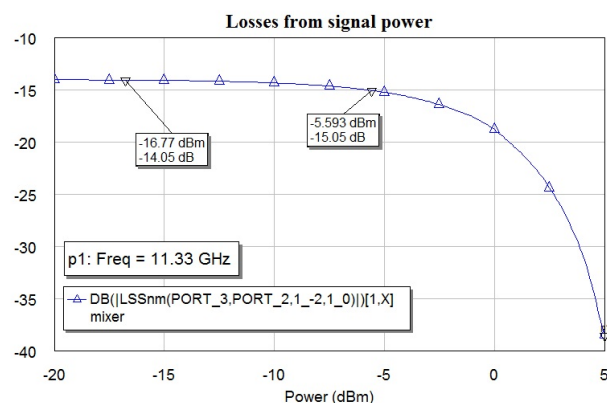


Рис. 7. Зависимость коэффициента передачи от мощности сигнала (двухдиодный смеситель)

В таблице 2 приведены значения основных параметров однодиодного смесителя на основе ДБШ, РТД 1 и РТД 2, в таблице 3 – значения основных параметров двухдиодного смесителя на основе ДБШ, РТД 1 и РТД 2.

Таблица 2

Значения параметров однодиодного субгармонического смесителя с различными нелинейными элементами

	ДБШ	РТД 1	РТД 2
Мощность гетеродина, дБм	5,02		
Потери преобразования, дБ	12,71	10,39	21,99
Уровень 1дБ компрессии, дБм	$P_{-1дБ} = -2,727$	$P_{-1дБ} = 7,902$	$P_{-1дБ} = 0,527$
Уровень IP_3 , дБм	$P_{IP_3} = 11,270$	$P_{IP_3} = 36,881$	$P_{IP_3} = 27,453$

Значения параметров двухдиодного субгармонического смесителя с различными
нелинейными элементами

	ДБШ	РТД 1	РТД 2
Мощность гетеродина, дБм	6	8,5	8,5
Потери преобразования, дБ	13,15	23,31	14,05
Уровень 1дБ компрессии, дБм	$P_{-1дБ} = -1,425$	$P_{-1дБ} = 2,171$	$P_{-1дБ} = -5,593$
Уровень $IP3$, дБм	$P_{IP3} = 13,781$	$P_{IP3} = 25,443$	$P_{IP3} = 20,129$

Анализ характеристик однодиодного СГСМ на ДБШ, РТД 1 и РТД 2 показал, что смеситель на основе РТД 2 работает некорректно, так как рабочая точка попадает на падающий участок ВАХ, а смеситель на основе РТД 1 обеспечивает лучшие значения параметров по сравнению с аналогичным смесителем на ДБШ. Это значит, что однодиодный СГСМ с РТД 1 в качестве нелинейного элемента превосходит СГСМ с ДБШ по следующим параметрам: потери преобразования, уровень 1 дБ компрессии и уровень $IP3$, что подтверждает целесообразность замены ДБШ на РТД в конструкции однодиодного СГСМ.

Характеристики двухдиодного смесителя также существенно зависят от вида нелинейного элемента: СГСМ на основе РТД 1 имеет слишком большие потери преобразования, а смеситель с РТД 2 обладает как преимуществами, так и недостатками по сравнению с его аналогом на ДБШ. Так, динамический диапазон по 1 дБ компрессии смесителя на РТД 2 уже, чем динамический диапазон по 1 дБ компрессии смесителя на ДБШ, но при этом динамический диапазон по уровню $IP3$ смесителя на РТД 2 шире, чем динамический диапазон по уровню $IP3$ смесителя на ДБШ. С учетом того, что использование РТД существенно упрощает конструкцию СГСМ (один РТД соответствует двум включенным встречно-параллельно ДБШ), можно сделать вывод, что замена является целесообразной.

Таким образом, в однодиодном субгармоническом смесителе рассмотренной конструкции предпочтительно использование в качестве нелинейного элемента РТД 1, в двухдиодном – РТД 2.

Для оценки надежности субгармонических смесителей на основе РТД проводилось ускоренное старение нелинейного элемента при температуре $T=300^{\circ}\text{C}$ в нагревательной печи на протяжении 27 часов. Было проведено пять циклов термических воздействий (1, 3, 8, 18 и 27 часов). ВАХ, полученные экспериментально, вводились в программу AWR

Microwave Office, в которой на основании этих данных рассчитывались характеристики смесителей. ВАХ РТД 1 до и после термических воздействий показаны на рис. 8. ВАХ РТД 2 до и после термических воздействий приведены на рис. 9.

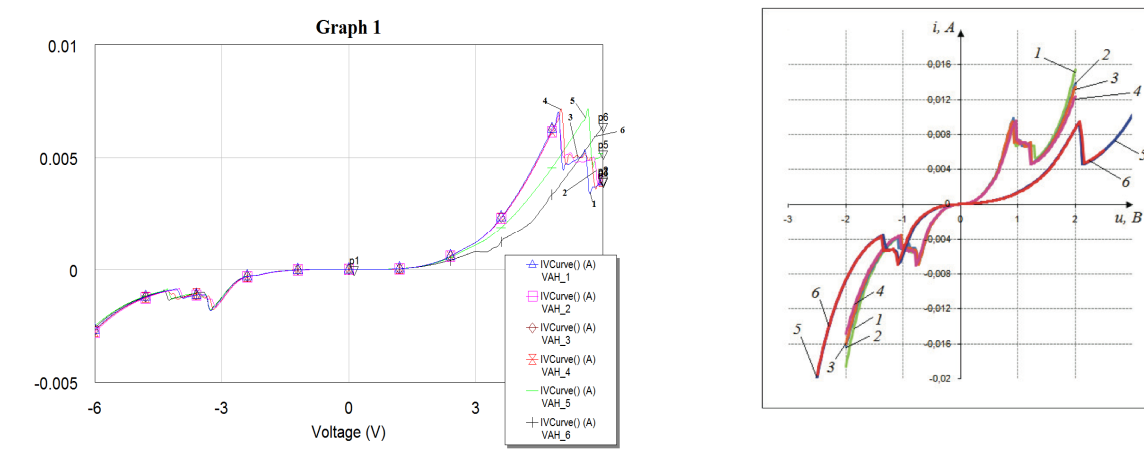


Рис. 8. ВАХ РТД 1 (слева) и ВАХ РТД 2 (справа) до и после термических воздействий ($T=300^{\circ}\text{C}$): 1 – до термических воздействий, 2 – после 1 часа термических воздействий, 3 – после 3 часов термических воздействий, 4 – после 8 часов термических воздействий, 5 – после 18 часов термических воздействий, 6 – после 27 часов термических воздействий

На рис. 10 показана зависимость потерь преобразования однодиодного СГСМ от мощности гетеродина в процессе температурной деградации РТД 1. На рис. 11 – зависимость потерь преобразования двухдиодного СГСМ от мощности гетеродина в процессе деградации РТД 2.

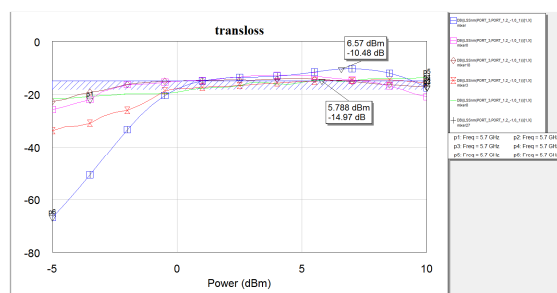


Рис. 10. Зависимость потерь преобразования от мощности гетеродина в процессе искусственного старения РТД 1 (однодиодный смеситель)

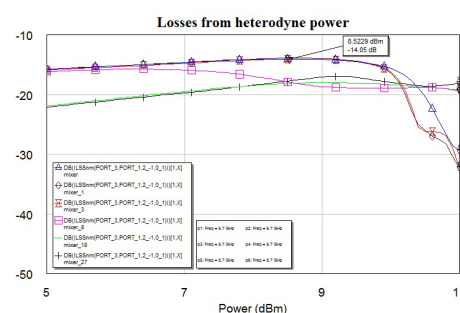


Рис. 11. Зависимость потерь преобразования от мощности гетеродина в процессе искусственного старения РТД 2 (двухдиодный смеситель)

На рис. 12, 13 показаны значения верхней границы динамического диапазона по уровню 1 дБ компрессии ($P_{-1\text{дБ}}$) и по уровню $IP3$ (P_{IP3}) после 0, 1, 3, 8, 18 и 27 часов температурных воздействий для однодиодного СГСМ. С увеличением времени температурных воздействий верхняя граница динамического диапазона по уровню 1 дБ компрессии $P_{-1\text{дБ}}$ изменяется незначительно, положение точки $IP3$ смещается вниз.

Аналогичные характеристики для двухдиодного СГСМ приведены на рис. 14, 15.

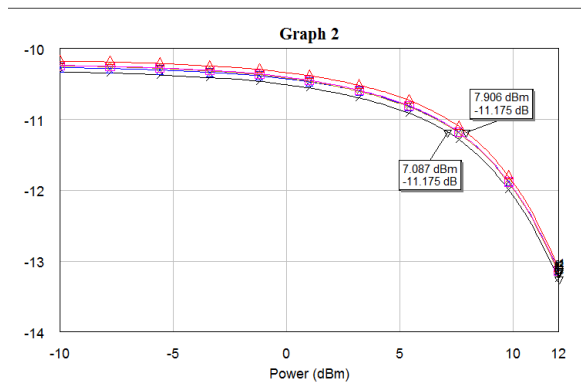


Рис. 12. Зависимость потерь преобразования от мощности сигнала после 0, 1, 3, 8, 18 и 27 часов температурных воздействий (однодиодный смеситель)

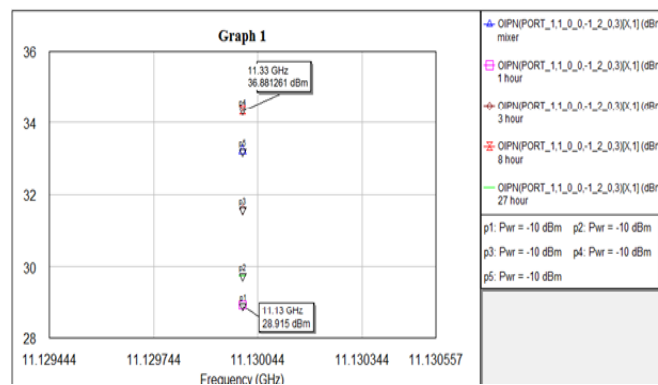


Рис. 13. Уровень $IP3$ после 0, 1, 3, 8, 18 и 27 часов температурных воздействий (однодиодный смеситель)

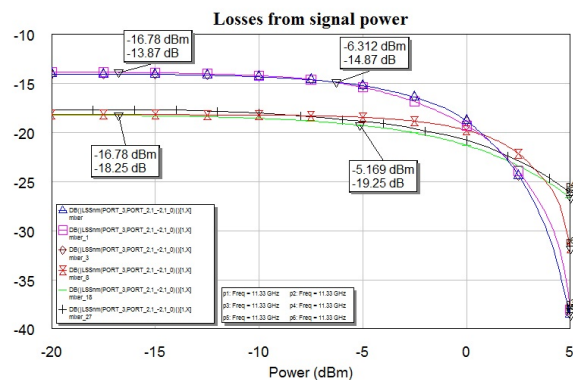


Рис. 14. Зависимость потерь преобразования от мощности сигнала в процессе температурных воздействий (двухдиодный смеситель)

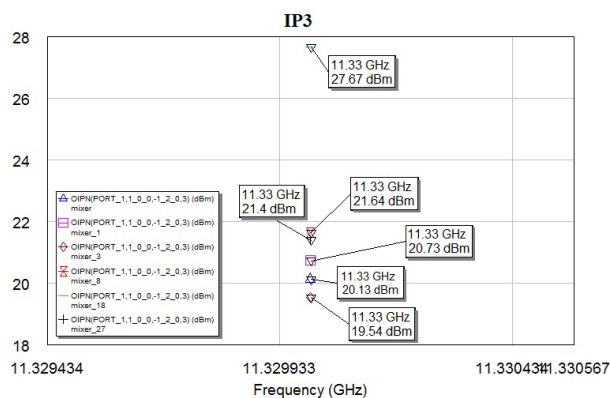


Рис. 15. Уровень $IP3$ после 0, 1, 3, 8, 18 и 27 часов температурных воздействий (двухдиодный смеситель)

В результате температурного воздействия основные характеристики однодиодного смесителя заметно ухудшаются: увеличивается значение потерь преобразования,

уменьшается верхняя граница динамического диапазона, положение точки *IP3* смещается вниз. При этом смеситель выполняет заданные функции.

В течение первых нескольких часов термической деградации нелинейного элемента характеристики двухбалансного смесителя меняются незначительно, однако после 8 часов термических воздействий потери преобразования резко увеличиваются, наступает параметрический отказ смесителя.

В таблице 4 представлены данные об изменении параметров однодиодного субгармонического смесителя под действием температурного фактора, в таблице 5 – параметры двухдиодного смесителя в процессе деградации нелинейного элемента.

Таблица 4

Изменение параметров однодиодного смесителя под действием температуры

Время воздействия Параметры	1 час	3 часа	8 часов	18 часов	27 часов
Потери преобразования, дБ	10,48	12,35	13,79	14,52	14,97
Уровень 1дБ компрессии, дБм	7,91	7,90	7,66	7,35	7,087
Уровень <i>IP3</i> , дБм	36,78	33,7	31,75	29,89	28,91

Таблица 5

Изменение параметров двухдиодного смесителя под действием температуры

Время воздействия Параметры	1 час	3 часа	8 часов	18 часов	27 часов
Потери преобразования, дБ	13,87	14,05	18,18	18,25	17,68
Уровень 1дБ компрессии, дБм	-6,31	-5,62	-1,33	-5,17	-5,97
Уровень <i>IP3</i> , дБм	20,73	19,54	21,64	27,67	21,40

Заключение

Расчет параметров однодиодных и двухдиодных СГСМ на РТД 1, РТД 2 и ДБШ показал, что замена ДБШ на РТД в обоих смесителях является целесообразной.

Исследовано влияние температурной деградации РТД на параметры схем СГСМ. Характеристики обоих СГСМ ухудшаются, параметрического отказа однодиодного смесителя не наступает, а двухдиодный смеситель выходит из строя после 8 часов ускоренного старения нелинейного элемента.

Список литературы

1. Ветрова Н.А., Иванов Ю.А., Мешков С.А., Назаров В.В., Синякин В.Ю., Федоренко И.А., Федоркова Н.В., Шашурин В.Д. Перспективы разработки нелинейных преобразователей радиосигналов на база резонансно-туннельных нанодиодов // Радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 5-14.
2. Дмитриев Е.Е. Основы моделирования в Microwave Office 2007. М.: Наука и техника, 2008. 176 с.
3. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. М.: Советское радио, 1972. 233 с.