

УДК 621.373.5

DOI: 10.52531/1682-1696-2023-23-1-48-54

Научная статья

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА «БЕЛОГО» ШУМА СВЧ ДИАПАЗОНА В ГИБРИДНОМ ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

А.А. Калинин,
А.А. Кондратьев, И.О. Жаров,
И.А. Козлов, П.Н. Астахов

АО «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. АКАДЕМИКА А.И. БЕРГА»

В статье рассмотрена методика разработки генераторов "белого" шума, позволяющая спроектировать в рабочем диапазоне частот шумовых диодов С и Х генераторы «квазибелого» шума с минимальной неравномерностью спектральной плотности мощности шума и максимально возможным избыточным коэффициентом шума, работающие в широком диапазоне температур.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: генератор шума, СВЧ, избыточный коэффициент шума

ВВЕДЕНИЕ

В физике и технике широко используется понятие цвета шумов, это система терминов, приписывающая некоторым видам стационарных шумовых сигналов определённые цвета, исходя из спектральной плотности мощности шума и его распределения по частоте (белый, розовый, красный, синий и т.д.) [7]. Теоретически "белый" шум имеет постоянную спектральную мощность шума в бесконечном диапазоне частот. В радиотехнике на практике применяют псевдобелый или "квазибелый" шум, представляющий шум с постоянной плотностью мощности в определённом конечном диапазоне частот [3].

В системах радиолокации, радиоэлектронной борьбы "квазибелый" шум используют в качестве аддитивного гауссовского "белого" шума как непрерывную активную прямошумовую помеху [4]. Для создания такого вида постановщика помех используют передатчики с задающим генератором шума специального назначения.

Original article

DEVELOPMENT OF A "WHITE" NOISE GENERATOR IN THE MICROWAVE RANGE IN A HYBRID INTEGRATED DESIGN

A.A. Kalinin, A.A. Kondratiev,
I.O. Zharov, I.A. Kozlov,
P.N. Astakhov

JSC «CENTRAL RESEARCH INSTITUTE
OF RADIO ENGINEERING NAMED AFTER
ACADEMICIAN A.I. BERG»

The article considers a technique for developing white noise generators, which makes it possible to design "quasi-white" noise generators in the operating frequency range of C and X noise diodes with a minimum non-uniformity of the noise power spectral density and the maximum possible excess noise factor operating in a wide temperature range.

KEYWORDS: noise generator, microwave, excess noise ratio

Генераторы «белого» шумового сигнала СВЧ диапазона широко используются в измерительном оборудовании в качестве калиброванного источника шума для измерения шумовых параметров (коэффициент шума, шумовой температуры и т.д.) транзисторов, усилителей, смесителей и приёмных СВЧ трактов. Современные линейки измерительных генераторов шума представлены у многих производителей: НПО «Микран» (серия ГШМ), Keysight (серии 346, 347, SNS и USB источники шума), Rohde Schwarz (серия SNS) и другие.

МАКЕТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ШУМА

Поставлена задача разработки генераторов «квазибелого» шума С и Х диапазона с минимальной неравномерностью спектральной плотности мощности шума и максимально возможным избыточным коэффициентом шума (ENR-excess noise ratio, далее ENR) для последующего усиления СВЧ шума до требуемой выходной мощности, работающим в широком диапазоне температур. Зачастую твердотельные генераторы шума построены на базе специализированных шумовых диодов, представляющих из себя кремниевые или арсенидгалиевые лавинно пролётные диоды [5], обратнo смещённые напряжением постоянного тока, ра-

ботающие в режиме пробоя. На отечественном рынке поставщиками таких шумовых диодов (генераторов) являются предприятия АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина, АО «НПП «Пульсар», фирмы Noisewave и Noisecom. В разрабатываемых генераторах за источник «белого» шума был выбран бескорпусной диод иностранного производства (ИП).

Собран макет генератора шума по схеме электрической принципиальной (рис. 1), где C1 – конденсатор фильтрующий питания, R1 – плёночный токоограничивающий резистор, C2 – разделительный конденсатор, DA1 – шумовой диод ИП, W1 и W2 – 50омная микрополосковая несимметричная линия. Поликоровая плата, с расположенной на ней элементами R1, C2, DA1, W1, W2 установлена на раму, как оказалось конструктив аналогично описанному в статье [2]. Цифровая 3D модель макета генератора шума, на рисунке 2а, построена с использованием средств SolidWorks [6]. Для предотвращения перегрева шумового диода был проведён тепловой расчёт (рис. 2б), тепловой поток мощностью 100 мВт (10мА × 10В) приложен к катоду шумового диода, температура основания рамы 90° С. Несмотря на то, что шумовой диод установлен на поликоровую плату, перегрев его активной зоны составил всего около 15° С относительно окружающей среды.

Несмотря, на равномерно распределённый спектр генерируемого «квазибелого» шума, при последующем усилении изготовленного макета генератора согласованными усилителями до требуемого уровня мощности, неравномерность спектра в требуемых диа-

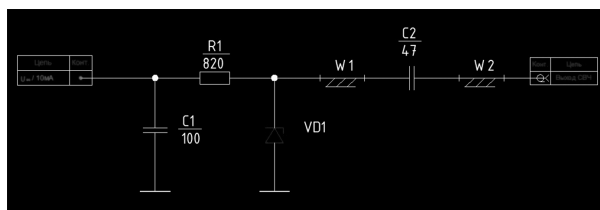


РИС. 1.

Макет генератора шума по схеме электрической принципиальной

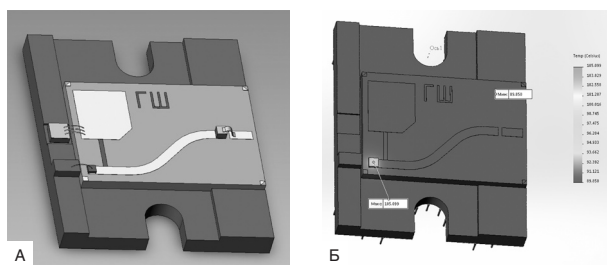


РИС. 2.

3D и тепловая модель макета генератора шума в гибридном интегральном исполнении

пазонах частот С и Х диапазона составляла 5–7 дБ. При измерении S11 (КСВН) макета обнаружено, что практически на всём рабочем диапазоне частот шумового диода, КСВН приближается к 10 или выше (рис. 3). Также на рисунке 3 показана зависимость КСВН от тока потребления шумового диода, макет оказался согласован на частоте в 9,5 ГГц при 10 мА, на 6–8 ГГц при 7 мА. Таким образом было принято решение о верификации электрической модели диода и последующем согласовании на требуемых диапазонах частот, с сохранением высокого уровня ENR и уточнения конструкции генератора шума.

СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШУМОВОГО ДИОДА

В рамках программ по импортозамещению АО «Светлана-Электронприбор» завершает разработку шумовых диодов с рабочим диапазоном частот до 18 ГГц (АЕЯР.432120.909ТУ). Выражаем благодарность коллективу предприятия за предоставленные макетные образцы шумовых диодов.

На рис. 4 показана конструкция макета для измерения электрических параметров диодов ИП и макетного образца 2Г202АН5 АЕЯР.432120.909ТУ. Питание на диоды и снятие СВЧ сигнала проводилось зондом типа земля-сигнал-земля для измерения планарных элементов интегральных схем средствами векторного анализатора цепей Keysight, с функцией подачи напряжения внешнего источника питания через СВЧ порты анализатора. Установлено что шумовые диоды ИП и диод 2Г202АН5 с током потребления в 10 мА имеют несущественные отличия S11 (рис. 5), видимо из-за использования близкой к зарубежной технологии производства, одинаковых размеров и материалов. На рисунке 6 показана зависимость коэффициентов отражения S11 диодов от токов потребления диодов, делаем вывод, что питание диодов должно быть от стабилизированного по току источника питания.

Проведённые климатические испытания в температурном диапазоне от -60 до +70 градусов показали, что согласование диодов следует проводить в более широком диапазоне частот (рис. 7), компенсируя уход импеданса шумовых диодов в зависимости от температуры разрабатываемого изделия.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА «КВАЗИБЕЛОГО» ШУМА

Далее по тексту рассмотрено согласование шумового диода ИП в С диапазоне. На основании импортированной модели шумового диода (10 мА) и электрической принципиальной схемы (рис. 1), также учитывая технологические возможности и особенности производства центра микроэлектроники АО «ЦНИРТИ имени академика А.И. Берга» получили математическую модель разрабатываемого генератора шума.

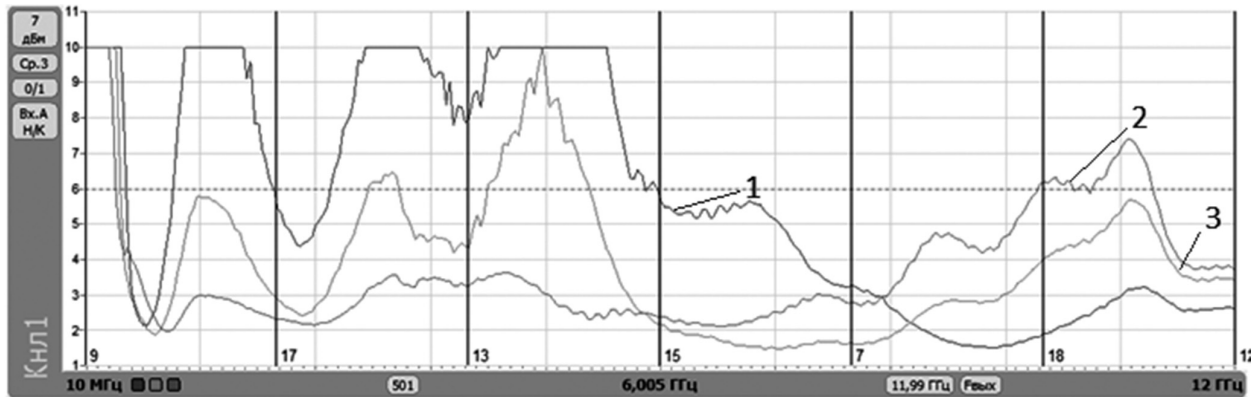


Рис. 3.

КСВН макета при 10 мА (график 1), КСВН макета при 7 мА (график 2), КСВН макета при 5 мА (график 3)

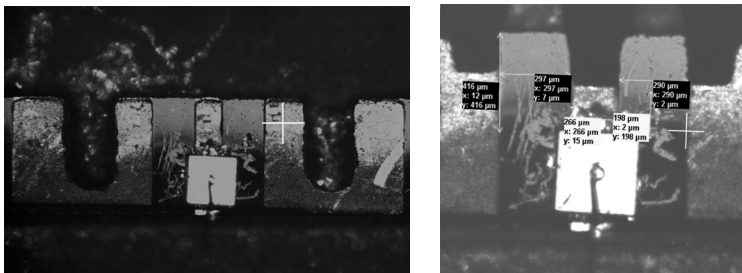


Рис. 4.

Поликорровая копланарная линия с установленным шумовым диодом

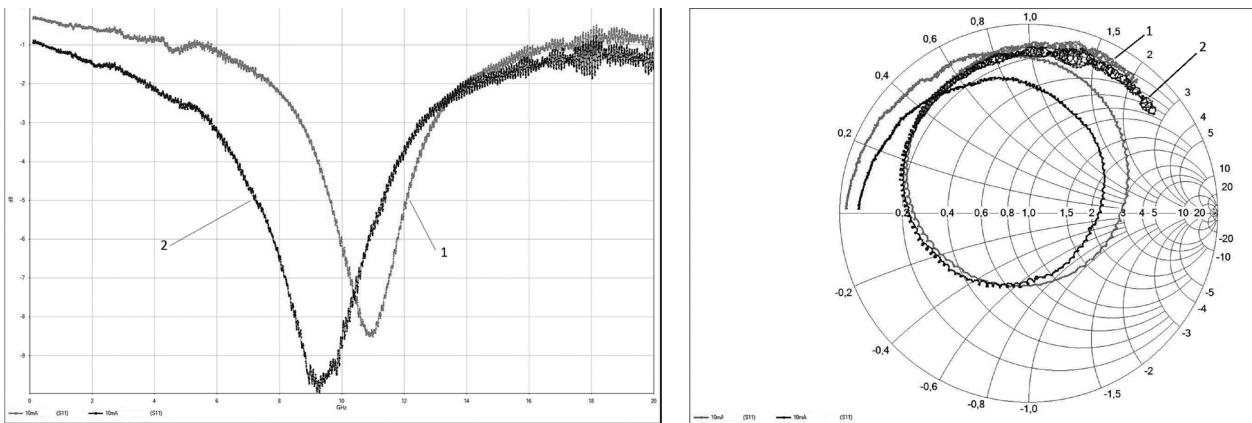
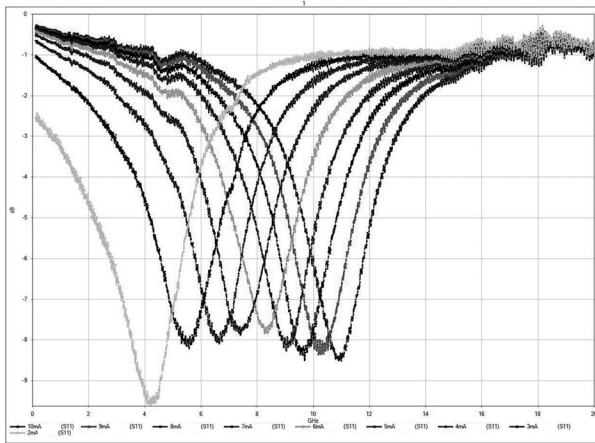


Рис. 5.

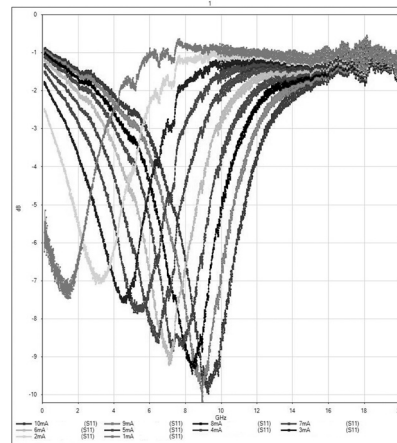
Характеристики импедансов шумовых диодов ИП (графики 1) и диода 2Г202АН5 (графики 2) при токе потребления в 10мА

В качестве метода оптимизации выбираем Simplex optimizer, так как он имеет простую схему оптимизации, достаточно быструю и точную, с количеством итераций около 1000. Изучив диаграмму Вольперта-Смита диода ИП и проведя несколько экспериментов выявили, что на выходе шумового диода необходимо большое сопротивление для его согласования с последующим СВЧ трактом усилителей. Решением стал трансформатор сопротивлений оптимизированный

в САПР. После проведения нескольких итераций и оптимизаций получения положительных результатов в линейном симуляторе требуется провести расчёт отклика полученной электромагнитной структуры в зависимости от её геометрии. Для расчёта отклика был выбран электромагнитный симулятор, использующий метод расчёта конечных мод в частотной области (рис. 8). К порту 1 подключаем электрическую модель диода, с порта 2 снимаем СВЧ сигнал. На



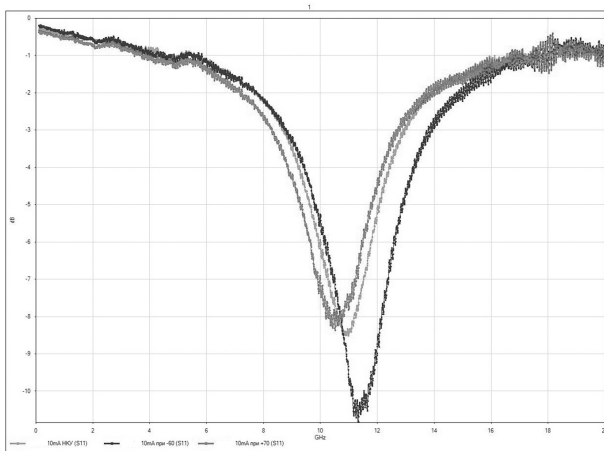
А



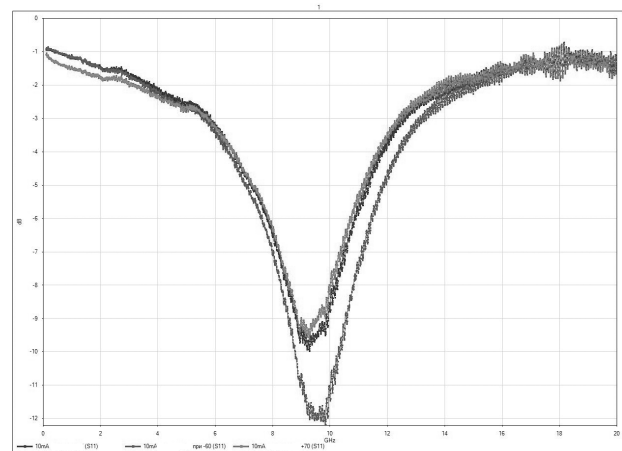
Б

Рис. 6.

Характеристики коэффициента отражения в дБ шумовых диодов NW305 (А) и диода тип 1 «Дискрет-45Т» (Б) в зависимости от токов потребления



А



Б

Рис. 7.

Характеристики коэффициента отражения в дБ шумовых диодов ИП (Б) и диода 2Г202АН5 (А) при воздействии повышенных и пониженных температур

диаграмме Вольперта-Смита (рис. 8), на графике 1 показан импеданс диода иностранного производства, график 2 – результат согласования в линейном симуляторе, график 3 – в электромагнитном симуляторе. Из графиков видно, что математический и электромагнитный расчёт в С диапазоне имеет высокую идентичность, таким образом считаем согласование в САПР завершённым.

По результатам моделирования спроектирован макет генератора шума, проведено измерение КСВН макетных образцов модуля в количестве двух штук (рис. 9). В требуемом диапазоне частот (маркер 6 и 4) КСВН макетов не превышал 2, что говорит об успешности проведённого согласования диода и моделирования в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА

По методикам измерения избыточного коэффициента шума (ENR) генерируемого устройства очень мало информации. Изначально пытались измерить избыточный коэффициент шума анализатором спектра, без дополнительных функций по измерению ENR, путём усиления измеряемого генератора шума усилителем СВЧ мощности (40 дБ) измеряя относительное изменение уровня шумовой полосы на анализаторе спектра усилителя с согласованной нагрузкой и с генератором шума на входе усилителя. Однако такого вида измерение имеет сравнительно большой разброс по достоверности измеряемых параметров и дело не только в чувствительности анализатора спектра, но и

в самом режиме работы усилителя при подаче именно шумового сигнала.

При измерении ENR специализированным измерителем коэффициента шума фирмы Keysight столкнулись со следующими проблемами. При измерении коэффициента шума (как в [1]) через СВЧ делитель путём примешивания избыточного шума исследуемого (спроектированного) генератора шума, на анализаторе шума характеристика была хаотична, видимо из-за самой специфики работы калиброванного генератора шума прибора (серия 346). Генератор шума 346 серии имеет импульсное питание, когда разработанный генератор «квазирозового» шума питается от постоянного напряжения.

Избыточный коэффициент шума (ENR) можно вычислить, зная температуру горячего источника шума и температуру холодного источника шума.

$$ENR_{dB} = 10 \lg \frac{T_h - T_c}{T_0}$$

где $T_0 = 290$ К.

Следует отметить, что источник шума с ENR, равный 0 дБ, создаёт разницу температуры в 290 К между включённым (On) и выключенным (Off) состояниями. Вопреки распространённому мнению, ENR не от-

ражает уровень шума в состоянии On относительно $kTB = -204$ дБ/Гц.

После работы с измерителем коэффициента шума, опираясь на значения ENR калиброванного генератора шума 346 серии, получили что:

$$ENR_{dB} = P_{b,dB} - P_{c,dB}$$

Значение $P_{c,dB}$ устройств генерации, в связи с очень маленькими амплитудами (0,1–0,2 дБ) можно пренебречь. В связи с этим ENR разработанного генератора розового шума в полосе частот составляет от 25 до 30 дБ в полосе рабочих частот шумового диода ИП при 10 мА (рис. 10А), и от 30 до 36 дБ с использованием диода 2Г202АН5 в той же топологии при 10 мА (рис. 10Б).

Интересно наблюдение, что при уменьшении тока потребления шумовых диодов избыточный коэффициент шума в рабочем диапазоне частот диодов растёт (рис. 11). Это утверждение распространяется и на отечественный диод.

На рис. 12 приведены результаты измерения ENR при климатических испытаниях на воздействие пониженной и повышенной температуры. Из графиков видно, что ENR разработанных генераторов устойчив в широком диапазоне температур.

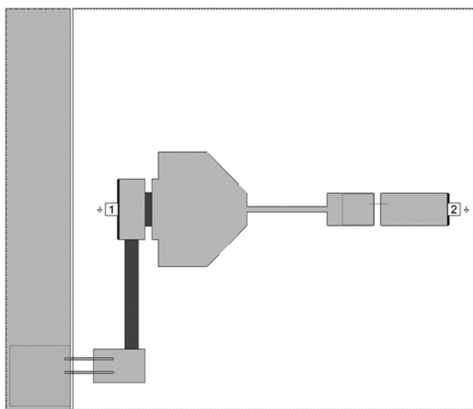


Рис. 8.

Электромагнитная модель генератора шума и полученные характеристики S11

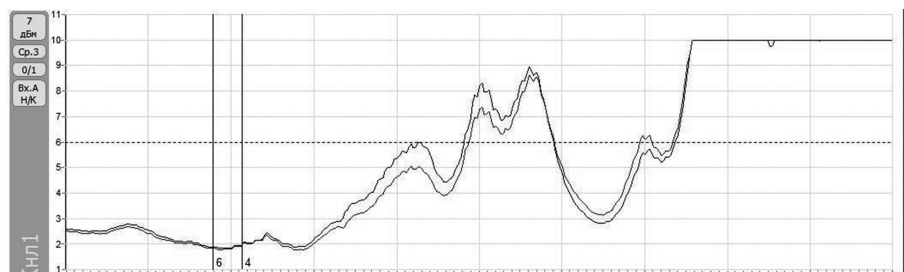
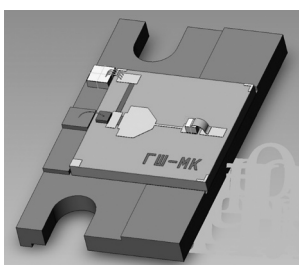
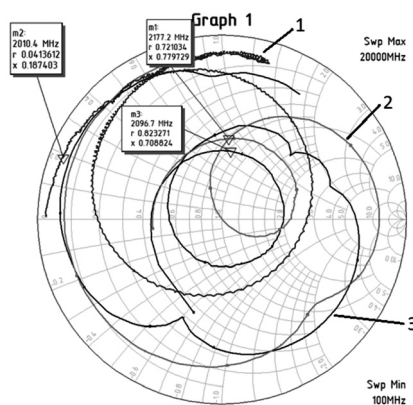
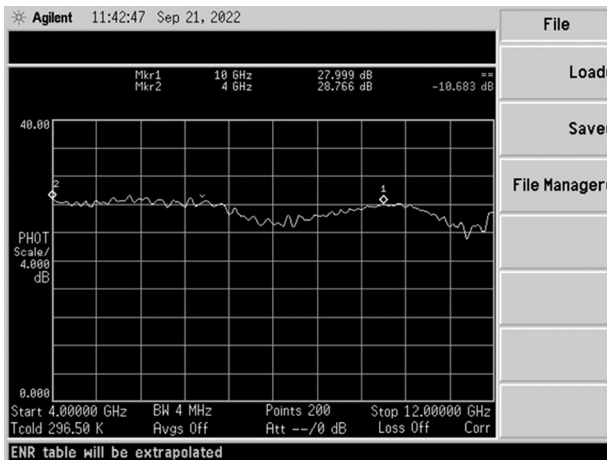


Рис. 9.

3D модель генератора шума, согласованного в С диапазоне и полученные характеристики КСВН



А

Рис. 10.

Измеренные показания ENR генераторов шума в гибридном интегральном исполнении

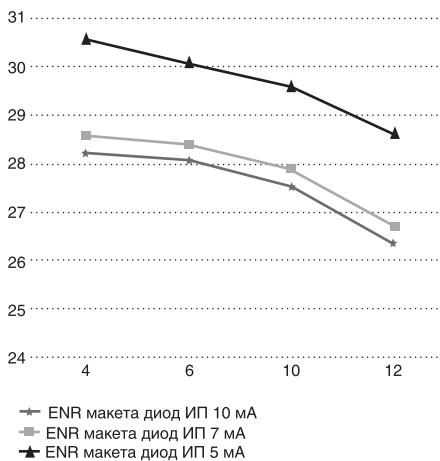
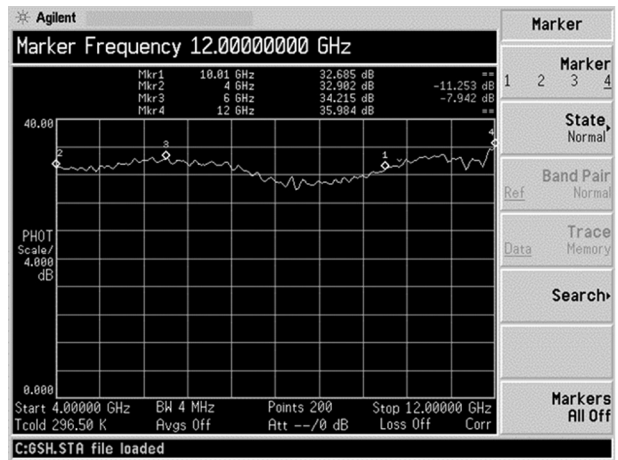


Рис. 11.

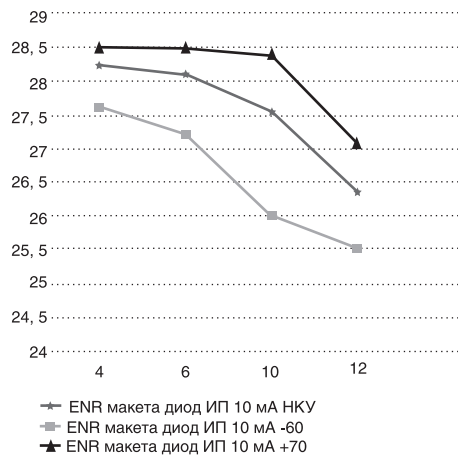
Измеренные показания ENR генераторов шума с диодом ИП



Б

Рис. 12.

Измеренные показания ENR генераторов шума с диодом ИП



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена методика разработки генераторов "белого" шума силами сотрудников центра микроэлектроники АО «ЦНИРТИ имени академика А.И. Берга», позволяющая спроектировать в рабочем диапазоне частот шумовых диодов С и Х диапазона генераторы «квазибелого» шума с минимальной неравномерностью спектральной плотности мощности шума и максимально возможным избыточным коэффициентом шума для последующего усиления СВЧ шума до требуемой выходной мощности, работающие в широком диапазоне температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. АБОЛДУЕВ И.М., ВЕЙЦ В.В., ГАРБЕР Г.З., ЕВГРАФОВ А.Ю., ЗУБКОВ А.М. и др. GaAs диод с барьером Шоттки для твердотельного генератора шума Х-диапазона // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2013. № 1(230). С. 22–25.

2. АБОЛДУЕВ И.М., ВЕЙЦ В.В., ЕВГРАФОВ А.Ю., МИННЕБАЕВ В.М., СОЛТАХАНОВ С.У., ЧЕРНЫХ А.В. Исследование СВЧ параметров GaAs диода с барьером Шоттки для генератора шума в Х-диапазоне частот // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2014. Вып. 3 (234). С. 4–8.
3. БЕРДЫШЕВ В.П., ГАРИН Е.Н., ФОМИН А.Н. и др. Радиолокационные системы : учебник, Красноярск : Сиб. федер. ун-т. 2011. 400 с.
4. БОТОВ М.И., ВЯХИРЕВ В.А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов : учеб., Красноярск : Сиб. федер. ун-т. 2013. 530 с.
5. ТАГЕР А.С., ВАЛЬД-ПЕРЛОВ В.М. Лавинно-пролётные диоды и их применение в технике СВЧ, Советское радио. 1968. 480 с.
6. DAVID C. Planchard and Marie P. Planchard. SolidWorks 2008 Tutorial. 2008.
7. https://ru.wikipedia.org/wiki/Цвета_шума.

REFERENCES

1. **ABOLDUEV I.M., VEIC V.V., GARBER G.Z., EVGRAFOV A.YU., ZUBKOV A.M., ET AL.** GaAs Schottky Barrier Diode for Solid State X-band Noise Generator. *Elektronnaia tehnika. Seria 2. Poluprovodnikovie pribori*. 22–25. (In Russian).
2. **ABOLDUEV I.M., VEIC V.V., EVGRAFOV A.YU., MINNEBAEV V.M., SOLTAKHANOV S.U., CHERNIKH A.V.** Investigation of the microwave parameters of a GaAs diode with a Schottky barrier for a noise generator in X-frequency range. *Elektronnaia tehnika. Seria 2. Poluprovodnikovie pribori*. 2014;3 (234): 4–8. (In Russian).
3. **BERDYSHEV V. P., GARIN E. N., FOMIN A. N., ET AL.** Radar systems: textbook. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t. 2011:400. (In Russian).
4. **BOYOV M.I., VYAKHIREV V.A.** Fundamentals of the theory of radar systems and complexes: textbook. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t. 2013:530. (In Russian).
5. **TAGER A.S., VALD-PERLOV V.M.** Avalanche-span diodes and their application in microwave technology. *Sovetskoe radio*. 1968:480. (In Russian).
6. **DAVID C.** Planchard and Marie P. Planchard. Solid-Works 2008 Tutorial. 2008.
7. https://ru.wikipedia.org/wiki/Цвета_шума (In Russian).

Калинин Алексей Алексеевич, аспирант базовой кафедры, начальник сектора О-41.3 АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга»

Кондратьев Алексей Алексеевич, начальник отдела О-41.2 АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга»

Жаров Игорь Олегович, инженер 3 категории отдела О-41.2 АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга»

Козлов Игорь Алексеевич, инженер 3 категории отдела О-41.2 АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга»

Астахов Павел Николаевич, начальник конструкторского бюро О-41.3 АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга»

☎ 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9,
107078, Moscow, st. New Basmanaya, b. 20, p. 9,
e-mail: leshkalin@rambler.ru