

Исследование СВЧ параметров GaAs диода с барьером Шоттки для генератора шума в X-диапазоне частот

И. М. Аболдуюев, В. В. Вейц, А. Ю. Евграфов, В. М. Миннебаев, С. У. Солтаханов, А. В. Черных

Представлены результаты изготовления и исследования GaAs диодов с барьером Шоттки, предназначенных для применения в генераторах шумового сигнала X-диапазона. Генератор используется в качестве источника при калибровке СВЧ приёмных трактов радиолокационных систем X-диапазона.

Ключевые слова: GaAs диод с барьером Шоттки, СВЧ генератор шума

Investigation of GaAs diodes with barrier Shottky for solid state noise source of X band

I. M. Abolduev, V. V. Veyz, A. Y. Evgrafov, V. M. Minnebaev, S. U. Soltakhanov, A. V. Chernykh

The results of investigation of GaAs diodes with barrier Shottky for solid state microwave noise sources are presented in this paper. The noise sources are used for calibration of microwave locators receivers.

Keywords: GaAs diode with barrier Shottky, microwave noise source

Введение

Генераторы шума (ГШ) широко используются в измерительной технике в качестве эталонного источника для измерения шумовых параметров транзисторов и усилителей, для контроля чувствительности приёмных устройств, в качестве задающего генератора в источниках помех, а также в качестве калиброванного источника «белого шума» в приёмных трактах радиоэлектронных систем (РЭС).

В ранее применявшихся в радиолокации генераторах шума использовались электровакuumные лампы. Вакуумные активные элементы требуют применения высоковольтных источников питания, что в отличие от твердотельных элементов не позволяет минимизировать габаритные и весовые характеристики аппаратуры. Целью настоящей работы является исследование активных элементов генераторов шума – лавинных или зенеровских диодов на основе арсенида галлия.

Арсенид галлия имеет более широкую запрещённую зону, чем кремний, вследствие чего диоды на его основе более устойчивы к воздействию радиации.

1. Конструкция шумового диода

1.1. Выбор параметров эпитаксиальной структуры для изготовления шумового диода

Известно, что для генерации СВЧ сигнала типа «белый шум» могут быть использованы диоды с зенеровским или лавинным пробоем [1, 2].

Для расчёта структуры диода была использована оригинальная программа для квазигидродинамической модели лавинно-пролётных диодов [3]. При моделировании принято, что структура GaAs диода имеет слои $n^+ - n - p^+$.

Расчитанные параметры исходного материала для пробивных напряжений 6 и 12 В приведены в табл.1, а соответствующие ВАХ диодов приведены на рис. 1.

Таблица 1

Результаты расчёта параметров исходного материала

Пробивное напряжение при комнатной температуре, В	Уровень легирования n - слоя, 10^{17} см^{-3}	Толщина n - слоя, мкм	Толщина обеднённого n - слоя, мкм, рассчитанная по программе [3]
12	1	0.4	0.4 (прокол)
6	7	0.2	0.13 (нет прокола)

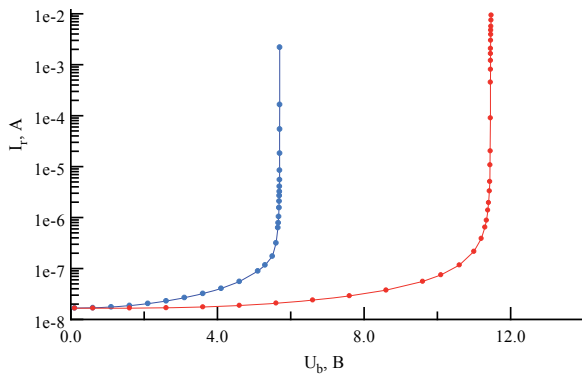


Рис. 1

ВАХ области пробоя диодов с площадью $n-p^+$ перехода, равной $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$, рассчитанные по программе [3]

1.2. Базовая технология изготовления шумового диода

Для изготовления шумового диода использовались эпитаксиальные структуры арсенида галлия типа $n-p^+$ «буферный- n^{++} подложка». Исходная подложка выращивалась методом Чохральского и легировалась теллуром до концентрации $(2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Эпитаксиальные слои – n -слой и n^+ -буферный слой осаждались на n^{++} -подложку методом МОС-гидридной эпитаксии. Были изготовлены опытные образцы шумовых диодов при уровне легирования рабочего эпитаксиального n -слоя $1 \cdot 10^{17} \dots 1.5 \cdot 10^{18}$.

В качестве рабочего перехода шумового диода использовался барьер Шоттки платина-арсенид галлия [4]. Платина наносилась на поверхность эпитаксиальной структуры методом ионно-плазменного распыления в атмосфере аргона. Толщина нанесенного слоя платины составляла 0.1 мкм. Активная область диода ограничивалась стандартными методами фотолитографии с последующим осаждением гальванического золота в открытые «окна» для создания контакта к барьеру Шоттки. Формирование мезоструктуры осуществлялось методом ионно-лучевого травления. Толщина высоколегированной n^{++} -подложки доводилась до 180-200 мкм с помощью химического травления во вращающемся стакане в полирующем травителе состава $\text{ZnNO}_3 \cdot 1\text{H}_2\text{O}_2$.

Омические контакты к n^{++} -подложке арсенида галлия создавались вакуумным напылением многокомпозиционной системы AuGe/Ti/TiN/Ti/Au с последующим отжигом в вакууме [5].

Для изоляции активной области диода использовалась пассивация светочувствительным защитным слоем ФП3515, что позволило подавить поверхностный пробой диода. Также возможно создавать изоляцию мезоструктуры посредством ионной имплантации VF_2^+ , что позволяет локализовать пробой в активной области диода.

Затем пластина разрезалась на кристаллы размером $0.4 \times 0.4 \text{ мм}^2$. На каждом кристалле формировались четыре структуры (рис. 2).

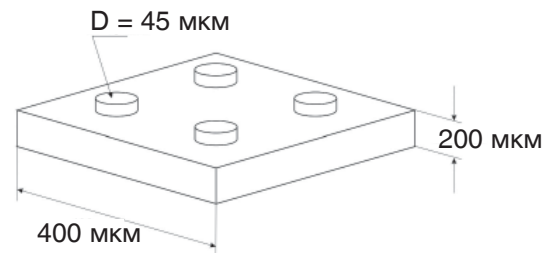


Рис. 2

Габаритные размеры кристалла шумового диода

2. Исследование параметров шумовых диодов

Исследовались статические и СВЧ характеристики шумовых диодов с напряжениями пробоя 5.5...14 В. На образцах измерялась спектральная плотность мощности шума (СПМШ) в диапазоне частот 7...13 ГГц и в диапазоне температур $-65 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.1. Измерение электрических параметров СВЧ модулей

Измерение основных СВЧ параметров проводилось на испытательном стенде, структурная схема которого представлена на рис. 3.

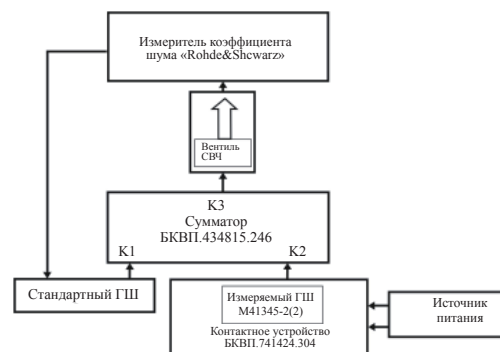


Рис. 3

Структурная схема испытательного стенда

В испытательный стенд входят:

- измеритель коэффициента шума «Rohde & Schwarz»;
- стандартный ГШ из комплекта измерителя коэффициента шума «Rohde & Schwarz»;
- сумматор БКВП.434815.246;
- контактное устройство БКВП.741424.304;
- вентиль СВЧ;
- источник питания с диапазоном напряжения 0-15 В, тока 0-50 мА.

Сумматор БКВП.434815.246 предназначен для широкополосного развязанного суммирования сигнала стандартного ГШ и измеряемого образца. Широкополосность сумматора обеспечена применением многоступенчатого делителя-сумматора X-диапазона, неравномерность разделения каналов составила не более 0.7 дБ во всем диапазоне частот.

Гибридные интегральные микросхемы (ГИС) на основе GaAs шумового диода [6] собраны в стандартном СВЧ металлокерамическом корпусе в виде модуля (рис. 4). Контактное устройство с сумматором показано на рис. 5. Испытательный стенд показан на рис. 6.

При исследовании модуля ГШ измерялись следующие параметры:

- рабочий диапазон частот, ГГц;
- спектральная плотность мощности шума в диапазоне температур, дБ;
- неравномерность спектральной плотности мощности шума в полосе частот, дБ;
- ток питания при заданном напряжении питания, мА.

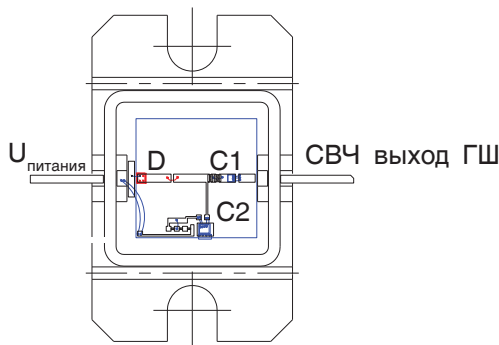


Рис. 4

Конструкция модуля генератора шума X-диапазона

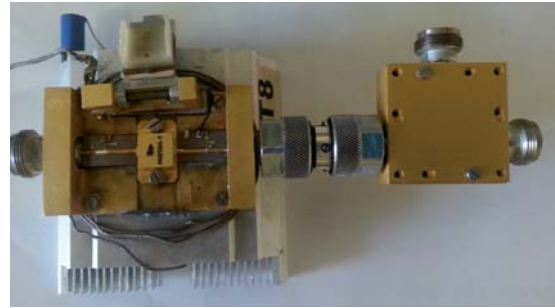


Рис. 5

Оснастка для измерения модулей генератора шума – контактное устройство и сумматор сигналов

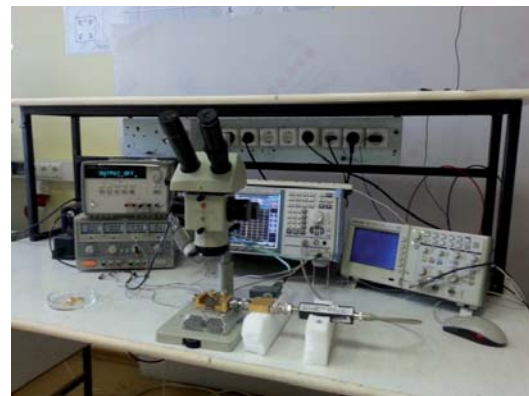


Рис. 6

Испытательный стенд на основе измерителя шумовых параметров «Rohde & Schwarz»

Зависимости СПМШ (G_A) изготовленных модулей ГШ на основе GaAs диодов от напряжения пробоя, температуры и тока потребления представлены на рис. 7, 8, 9.

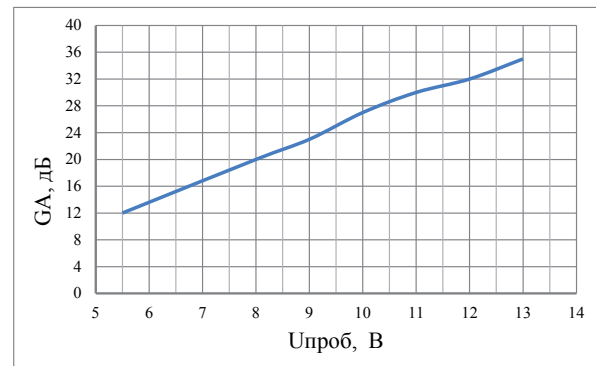


Рис. 7

Зависимость величины СПМШ (G_A) генератора шума от напряжения пробоя шумового диода

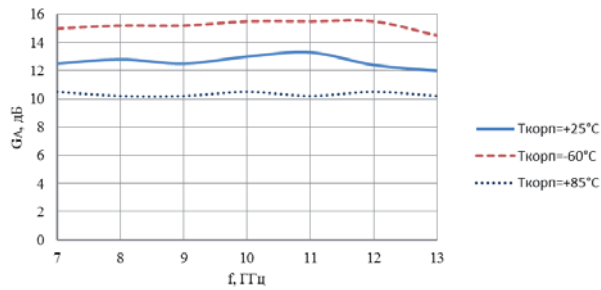


Рис. 8

Зависимость величины СПМШ (G_A) генератора шума в диапазоне частот при разных температурах

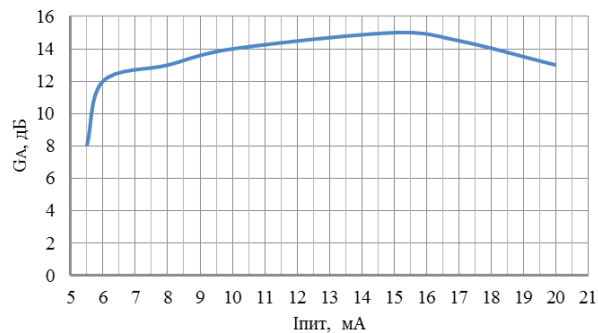


Рис. 9

Зависимость СПМШ (G_A) ГШ от тока питания

2.2. Восстановление эквивалентной схемы шумового диода в рабочем режиме

Восстановление эквивалентной схемы шумового диода проведено на основе измерения S -параметров диода в специальной оснастке, обеспечивающей включение диодов в измерительный тракт с помощью СВЧ зондов. Были изготовлены калибровочные меры, соответствующие 300-микронным СВЧ зондам и обеспечивающие калибровку измерительного оборудования и включение измеряемых образцов в СВЧ тракт с минимальными паразитными параметрами. Схема включения диода в СВЧ тракт представлена на рис. 10.

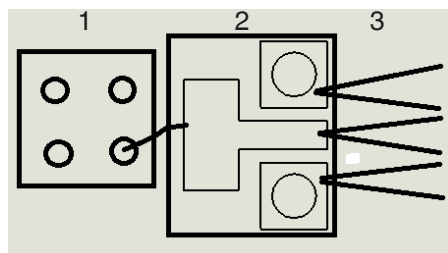


Рис. 10

Схема подключения образца шумового диода к СВЧ зондам (1 – кристалл шумового диода, 2 – калибровочная плата, 3 – копланарный СВЧ зонд)

Параметры эквивалентной схемы шумового диода получены из результатов измерения и расчёта принятой эквивалентной схемы в диапазоне частот 0.01...18 ГГц при их совпадении (рис. 11).

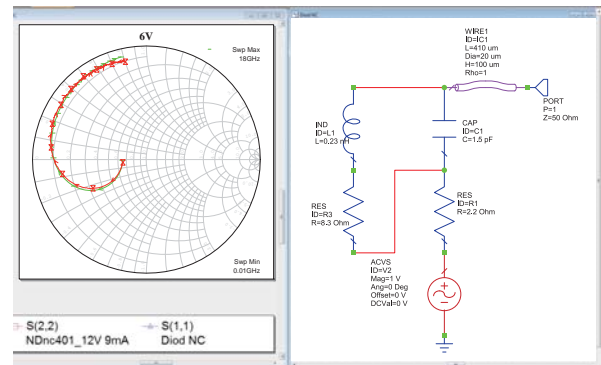


Рис. 11

Результат измерения S -параметров диода в рабочем режиме $S(1,1)$ и расчёта соответствующей эквивалентной схемы $S(2,2)$

Шумовые диоды с различными пробивными напряжениями имеют отличающиеся по номиналам схемы замещения. Результаты восстановления параметров схемы замещения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры эквивалентной схемы

Параметр эквивалентной схемы	$U_{\text{проб}} = 6 \text{ В}$	$U_{\text{проб}} = 8 \text{ В}$	$U_{\text{проб}} = 12 \text{ В}$
$L_{\text{сборки}} (IC1), \mu$	624	406	364
$L_{\text{диода}} (L1), \text{нГн}$	1.04	0.23	0.318
$R_{\text{диода}} (R3), \text{Ом}$	28.89	8.29	2.5
$C_{\text{диода}} (C1), \text{пФ}$	6.266	1.55	1.2
$R_s (R1), \text{Ом}$	2.01	2.21	4.29

Полученные параметры эквивалентной схемы позволяют согласовать шумовой диод в рабочем режиме с СВЧ трактом и получить в нагрузке более высокий или необходимый уровень шума [6, 7].

Заключение

1. Изготовлены образцы шумовых диодов с напряжениями пробоя 5.5...14 В.

2. Диоды собраны в ГИС генераторов шума. Измерена СПМШ в диапазоне частот 7...13 ГГц.

3. На основе СВЧ измерений S-параметров в диапазоне частот 0.01...18 ГГц восстановлена эквивалентная схема шумового диода в рабочем режиме.

4. Получены зависимости СПМШ генераторов шума от напряжения пробоя, рабочего тока и температуры.

Литература

1. Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролётные диоды и их применение в технике СВЧ. – М.: Издательство «Советское радио», 1968.

2. Somlo P. I. Zener-diode noise generator. *Electronics letters*, 1975, vol. 11, no. 14, p. 290.

3. Гарбер Г. З. Квазигидродинамическая модель лавинно-пролётных диодов // *Радиотехника и электроника*. – 1995. – Т. 40. – № 3. – С. 495-498.

4. Вейц В. В., Андреева Е. А. Электрические свойства барьера Шоттки платина-арсенид галлия // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 1974. – С. 3-9.

5. Вальд-Перлов В. М., Вейц В. В. Низкоомный омический контакт к n-GaAs // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2008. – Вып. 2 (221). – С. 58-61.

6. Аболдуйев И. М., Вепринцев К. С., Герасимов А. О., Миннебаев В. М. Твердотельный генератор шума X-диапазона с высоким уровнем СПМШ // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2011. – Вып. 1 (226). – С. 67-70.

7. Аболдуйев И. М., Вейц В. В., Гарбер Г. З., Евграфов А. Ю., Зубков А. М., Миннебаев В. М., Черных А. В. GaAs диод с барьером Шоттки для твердотельного генератора шума X-диапазона //

Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – Вып. 1 (230). – С. 22-26.

References

1. Tager A. S., Vald-Perlov V. M. *Lavinno-proletnyye diody i ikh primeneniye* [IMPATT-diodes and their application in microwave frequency technique]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1968.

2. Somlo P. I. Zener-diode noise generator. *Electronics letters*, 1975, vol. 11, no. 14, p. 290.

3. Garber G. Z. Quasi-hydrodynamic model of IMPATT-diodes. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1995, vol. 40, no. 3, pp. 495-498.

4. Veytz V. V., Andreeva E. A. Electrical properties of the Pt-GaAs Sottky barrier. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 1974, pp. 3-9.

5. Vald-Perlov V. M., Veytz V. V. Low-resistance ohmic contact to n-GaAs. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2008, no. 2, pp. 58-61.

6. Abolduev I. M., Vepintsev K. S., Gerasimov A. O., Minnebaev V. M. Solid-state oscillator of noise of X-band with high NPSD level. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2011, no. 1, pp. 67-70.

7. Abolduev I. M., Veytz V. V., Garber G. Z., Evgrafov A. Y., Zubkov A. M., Minnebaev V. M., Chernykh A. V. GaAs-diode with Sottky barier for solid-state oscillator of noise of X-band. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, no. 1, pp. 22-26.