

II. Исследование измерительной аппаратуры

УДК 621.37

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГЕНЕРАТОРА ШУМА С ВЫХОДНЫМ ВОЛНОВОДНЫМ СЕЧЕНИЕМ WR-5Ю.А. Буренков, О.В. Каминский, И.М. Малай, М.В. Саргсян
ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

Представлен экспериментальный образец макета измерительного тракта компаратора от 170 до 220 ГГц и низкотемпературный генератор шума с выходным волноводным сечением WR-5, который используется в качестве первичной эталонной меры. Рассмотрен метод расчета выходной шумовой температуры, представлены результаты экспериментальных исследований по измерению распределения температуры вдоль теплоизолирующей линии. Проведен анализ математической модели для расчета выходной шумовой температуры. Приведены результаты расчета выходной шумовой температуры.

An experimental sample of the comparator measuring route from 170 to 220 GHz and a low-temperature noise generator with an output waveguide cross section WR-5, which is used as a primary standard measure, are presented. A method for calculating the output noise temperature is considered, and the results of experimental tests for measurement of the temperature distribution along the thermal insulating line are presented. The analysis of the mathematical model for calculation of the output noise temperature is carried out. The results of calculating the output noise temperature are presented.

Ключевые слова: шумовая температура, измерительный тракт компаратора

В 2015 году был принят к реализации и в 2016 году создан экспериментальный образец макета измерительного тракта компаратора от 170 до 220 ГГц с целью расширения частотного диапазона ГЭТ 21-2011 до 220 ГГц. На рисунке 1 представлена его структурная схема. Внешний вид макета представлен на рисунке 6.

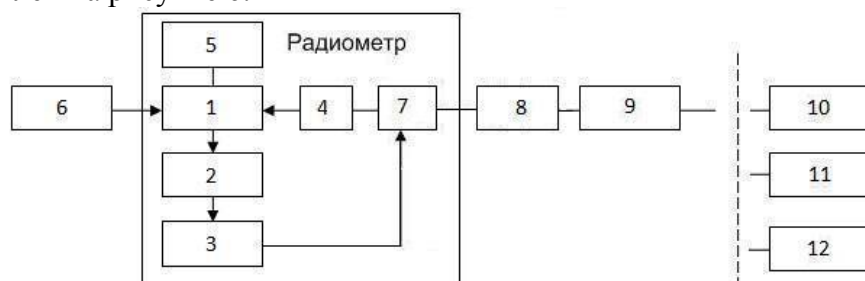


Рис. 1. Структурная схема макета компаратора 178-220 ГГц

- | | |
|---|----------------------------|
| 1. Смеситель | 2. Предварительный УПЧ |
| 3. Индикатор | 4. Вентиль |
| 5. Блок смещения напряжения на смесительном диоде | 6. Гетеродин |
| 7. Смеситель | 8. Вентиль |
| 9. Образцовый аттенюатор | 10. Эталонный НГШ |
| 11. Калибруемый ГШ | 12. Согласованная нагрузка |

В состав макета вошло следующее основное оборудование:

Широкополосный частотно-настраиваемый приемник РМ – 1.5 – 4.0 -МД (далее - радиометр) 178 – 220 ГГц, который включает в себя следующие позиции структурной схемы: 1, 2, 3, 4, 5, 7. Радиометр предназначен для измерения шумового радиоизлучения низкотемпературных, полупроводниковых и газоразрядных генераторов шума с уровнем шумовой температуры от 77,4 К до 1000 К. Данный приемник может быть использован также для измерения ослабления в элементах СВЧ тракта диапазона частот 178 – 220 ГГц и для измерений параметров аттенюаторов этого диапазона длин волн. Для проведения измерений необходимо использовать внешний гетеродин, выход которого подсоединяется на отдельный вход радиометра. Тип волновода WR-5. Тип входных фланцев UG-387. Внешний вид радиометра представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Радиометр, (разъем питания, выходы RS232 и USB, входы сигнала и гетеродина 178 – 220 ГГц)

В качестве гетеродина (позиция структурной схемы - 6) используется генератор сигналов ВЧ Г4-МВМ-220 с диапазоном воспроизводимых частот 140 – 220 ГГц. Тип волновода WR-5. Тип выходного фланца UG-387.

Генераторы шума (сокращенно ГШ, позиция структурной схемы - 11) предназначены для использования в составе эталона СПМШ как источник шумового сигнала в диапазоне частот 160 - 220 ГГц в волноводе WR-5 с выходным фланцем UG-387/U-M в качестве рабочего эталона второго разряда единицы СПМШ. На рисунке 3 представлены полупроводниковый и газо-

разрядный генераторы шума с их характеристиками.



Генератор шума ГШ-05/160-192
Избыточная шумовая температура
8 – 14 дБ
Неравномерность избыточной шумовой температуры, дБ ± 3
Напряжение питания, В + 18...+ 28

Газоразрядный генератор шума ГГШ В1,3x0,65
Избыточная шумовая температура 4-6 дБ.
Погрешность значений СПМШ на выходе генераторов после градуировки не более $\pm 10\%$.
Номинальное значение тока через генератор шума должно быть в пределах 60-70 мА. Погрешность установки тока не должна быть более 1%.

Рис. 3. Внешний вид и основные метрологические и технические характеристики полупроводникового и газоразрядного ГШ с блоком питания

Использование на входе измерительного тракта образцового аттенюатора (позиция структурной схемы - 9) позволит расширить динамический диапазон измеряемых сигналов до 10000 – 100000 К. В качестве образцового аттенюатора используется аттенюатор волноводный поляризационный АП-30 с рабочим диапазоном частот 140 - 220 ГГц, каналом волновода WR-5 (1,3 × 0,65 мм) и фланцами UG387/UM (рисунок 4).



Диапазон устанавливаемых ослаблений от 0 до 50 дБ.

Пределы допускаемой погрешности установки ослабления:

- в диапазоне от 0 до 10 дБ: $\pm 0,3$ дБ;
- в диапазоне от 10 до 50 дБ: $\pm 0,03 \cdot A$ дБ,

где A – значение установленного ослабления в дБ.

КСВН входа и выхода аттенюатора не более 1,3.

Начальное ослабление аттенюатора не более 3,0 дБ.

Рис. 4. Внешний вид и основные метрологические и технические характеристики аттенюатора волноводного поляризационного АП-30

Помимо основных средств измерения, которые используются в измерительном тракте, в составе компаратора присутствует измеритель мощности М2-МВМ-220. Он предназначен для измерения и контроля мощности гетеродина радиометра с рабочим диапазоном частот 140 - 220 ГГц, каналом волновода WR-5 (1,3 × 0,65 мм) и фланцами UG387/UM и состоит из блока измерительного М2-МВМ и преобразователя СВЧ М2-МВМ-220 (рисунок 5).



Диапазон рабочих частот 140,0 – 220,0 ГГц;

Диапазон измерения мощности 0,001 – 10 мВт;

Разрешающая способность 0,1 мкВт;

Пределы допускаемой основной погрешности измерения мощности не более $\delta = 6\% + 2$.

Рис. 5. Внешний вид и основные метрологические и технические характеристики измерителя мощности М2-МВМ-220



Рис. 6. Внешний вид макета измерительного тракта компаратора от 170 до 220 ГГц

Низкотемпературный генератор шума с выходным волноводным сечением WR-5 и выходным фланцем UG-387/U-M (сокращенно НГШ, позиция 10) является источником шумового сигнала в диапазоне частот от 140 до 220 ГГц в макете компаратора 170 - 220 ГГц и предназначен для использования в составе Государственного первичного эталона СПМШ ГЭТ 21-2011. На радиаторе НГШ имеется разъём для подключения к измерителю температуры МИТ8.10. Внешний вид НГШ представлен на рисунке 7.

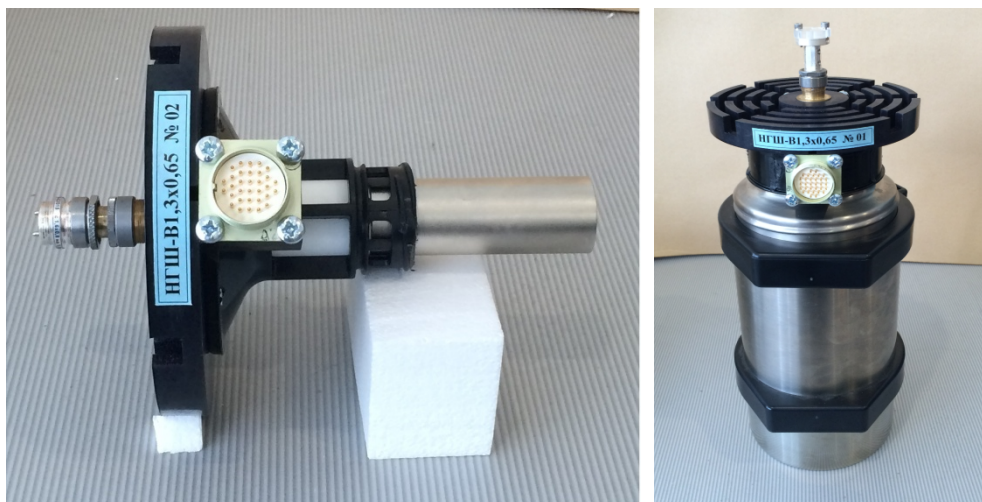


Рис. 7. Низкотемпературный генератор шума НГШ В1,3х0,65 и его общий вид с криостатом:

выходная шумовая температура 120-160 К;
 неопределенность шумовой температуры не более 5-7 К; Стабильность за час 0,1 К;
 размер Д×Ш×В 150 мм×120 мм×120 мм

НГШ состоит из пяти основных узлов:

нагрузка согласованная охлажденная до температуры жидкого азота.

теплоразвязывающая линия (отрезок тонкостенного волновода WR-5 длиной 130 мм).

термометры для определения распределения температуры вдоль волновода.

выходной отрезок волновода WR-5 при комнатной температуре длиной 20 мм.

радиатор для стабилизации температуры выходного волновода

Нагрузка согласованная представляет собой излучатель из ферроэпоксида в волноводе WR-5 (1,3 × 0,65 мм).

Волновод теплоразвязывающей линии изготовлен из меди. Толщина стенок на всей длине 80 мм имеет толщину 0,4 мм. Волновод имеет промежуточное герметизирующее фланцевое соединение с фторопластовой прокладкой, толщина которой 0,03 мм. В качестве ванны для жидкого азота применен стальной сосуд Дьюара объемом 1,5 литра. Уровень азота сохраняется в течение одного часа. После чего необходимо доливать жидкий азот. Количество доливок не ограничивается в течение 24 часов. Для стабилизации и доведения температуры выходного фланца до температуры окружающей среды волновод снабжен радиатором с вентилятором.

В таблице 1 представлены результаты измерения КСВН выхода НГШ в рабочем режиме в диапазоне частот 140-180 ГГц. Нагрузка согласованная находится при температуре азота. Измерения проводились при помощи панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-123М.

Таблица 1

Частота, ГГц	140	145	150	155	160	165	170	175	180
КСВН	1,11	1,12	1,13	1,09	1,06	1,08	1,12	1,12	1,05

Температура азота и выходного фланца измеряются при помощи термометров ПТС 23, распределение температуры вдоль волновода измеряется при помощи шести (восьми) термометров ПТ 100. Выводы термометров присоединены к разъему на радиаторе для измерения температуры при помощи измерителя МИТ8.10. Погрешность измерения температуры не превышает $\pm 0,3$ К. Экспериментальные исследования подтвердили соответствие стабильности распределения физической температуры вдоль теплоизолирующей линии в течение одного часа (не более $\pm 0,1$ К). С учетом неопределенности координаты термометров погрешность измерения распределения температуры не превышает $\pm 0,8$ К. На рисунке 8 представлено распределение температуры от нагрузки, согласованной до выходного фланца в табличном и графическом виде.

Номер точки	Длина, мм	Температура, К
1	0	81,0
2	35	81,0
3	45	97,5
4	55	129,0
5	65	158,0
6	75	186,0
7	85	217,0
8	95	248,0
9	105	281,0
10	115	286,85
11	130	290,49
12	155	293,50



Рис. 8. График распределения температуры

На рисунке 9 представлено измерение распределения температуры вдоль теплоизолирующей линии НГШ при помощи МИТ8.10.



Рис. 9. Измерение распределения температуры вдоль теплоизолирующей линии НГШ при помощи МИТ8.10

Расчет эффективной шумовой температуры проводился по формуле (1) [1]. Теплоизолирующая линия была разбита на 12 отрезков. Шумовая температура на выходе k -го отрезка выражена в виде

$$T_{k+1} = T_k + 0,23\alpha_k\Delta z_k(T_{dk} - T_k), \quad (1)$$

где T_k – шумовая температура на входе k -го отрезка волновода, T_{dk} – его средняя физическая температура; Δz_k – длина отрезка; α_k – постоянная затухания k -го отрезка при температуре T_{dk} :

$$\alpha_k = \alpha_{295}\sqrt{1 - \gamma(295 - T_{dk})}, \quad (2)$$

где α_{295} – постоянная затухания при комнатной температуре; $\gamma = 0,0043 \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент удельного электрического сопротивления серебра [2, 3]. Выходную шумовую температуру НГШ определяли в результате последовательного расчета по (1) для каждого отрезка волновода. Значения выходной шумовой температуры представлены в таблице 2.

Таблица 2

Частота, ГГц	140	150	160	170	180	190	200	210	220
Шумовая температура, К	122,6	120,9	118,5	116,7	114,9	113,7	112,8	112,2	111,6

Расчетное значение неисключенной систематической погрешности на частоте 180 ГГц составило 1,43 К при СКО = 0,73 К.

Литература

1. Емельянова Л.П. Низкотемпературный СВЧ генератор шума// Измерительная техника, 1985, № 9, с. 54.
2. Справочник по физико-техническим основам криогеники/ Под ред. И.П. Малкова – М.: Энергия, 1973.
3. Таблицы физических величин. Справочник/ Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.