

УДК 538.569

В. В. КОЛЕСОВ, Э. И. РАУ

## ИЗМЕРЕНИЕ СЛАБЫХ СВЧ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ЗОНДА

Как было показано в [1], метод измерения энергии СВЧ резонатора с помощью пучка электронов обладает высокой чувствительностью. Для реализации предельной чувствительности в эксперименте необходимо иметь электронно-оптическую систему с минимальными aberrациями, размер фокального пятна приближать к дифракционному размеру и понижать физическую температуру резонатора.

В данной работе описывается эксперимент, в котором СВЧ сигнал измерялся при помощи пучка электронов, сформированного в растровом электронном микроскопе *JSM-U3*.

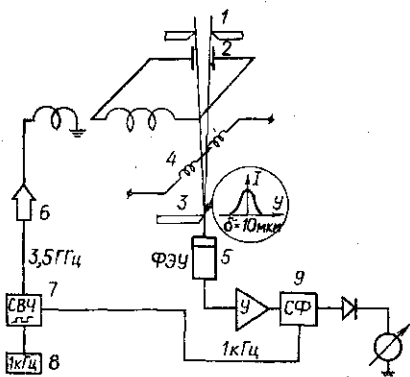


Рис. 1

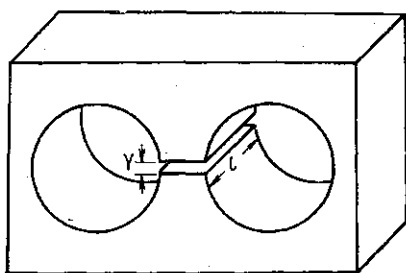


Рис. 2

Схема измерения показана на рис. 1. Остро сфокусированный электронный зонд микроскопа ограничивается диафрагмой (1). Далее луч проходит через емкостной зазор СВЧ резонатора (2) и фокусируется на край ножевой диафрагмы (3). Точная юстировка пятна в области максимальной чувствительности осуществлялась с помощью дополнительных катушек (4). За ножевой диафрагмой располагается регистрирующая система в виде сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (5). СВЧ резонатор представляет собой закрытый полу-волновой резонатор магнетронного типа, нагруженный на емкость (рис. 2). С обеих сторон в крышках резонатора проделаны отверстия ( $\sim 200$  мкм) для прохождения электронного луча. Размеры емкостного зазора подобраны таким образом, что  $\omega\tau_{пр} = \pi$ , где  $\tau_{пр} = l/V_x$ ,  $\omega$  — резонансная частота,  $V_x$  — скорость электронов.

Резонансный СВЧ сигнал, модулированный меандром ( $f_m = 1$  кГц), подается через однонаправленный элемент (6) на резонатор от СВЧ генератора Г4-9 (7). Генератор имеет калиброванный аттенуатор, позволяющий получать ослабление  $-140$  дБ. Предварительно генератор был откалиброван с помощью измерителя СВЧ мощности МЗ-22 на

уровнях 100, 10 и 1 мкВт. Частота модуляции  $f_m = 1$  кГц синхронизировалась опорной частотой 1 кГц от частотомера Ф576 (8) ( $\Delta f/f \approx \approx 10^{-7}$ ).

Электрическое СВЧ поле в емкостном зазоре резонатора вызывает смещение луча в направлении, перпендикулярном оси симметрии системы. Колебания фокального пятна с помощью ножевой диафрагмы преобразуются в колебания тока на входе системы регистрации. Электроны, не задержанные ножевой диафрагмой, попадают на сцинтиллятор. Электроны обладают энергией  $\sim 10$  кэВ, из которых около 2 кэВ затрачивается на прохождение полупрозрачного слоя алюминия, покрывающего входное окно сцинтиллятора, около 2% от оставшейся энергии преобразуется в фотоны. Сцинтиллятор дает в среднем 65 фотонов на каждый электрон, попавший на коллектор. Лишь 40% фотонов достигает фотокатода, и если эффективность фотокатода  $\sim 15\%$ , то на входе ФЭУ будет в среднем 4 электрона на каждый попадающий на коллектор электрон [2]. Далее сигнал частоты  $f_m = 1$  кГц поступает на систему усилителей и фильтров, затем детектируется и регистрируется самописцем (9).

Расчетная чувствительность системы по напряжению на емкостном зазоре при условии, что ток в пятне имеет гауссово распределение и присутствует лишь дробовой шум пучка, равна

$$U_0 = \frac{BmY \omega V_x \delta}{2eL} \sqrt[4]{\frac{e}{\tau I_0}}, \quad (1)$$

где  $B$  — константа ( $\sim 1$ ),  $\delta$  — размер фокального пятна,  $I_0$  — ток в пучке,  $\tau$  — время измерения,  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона,  $L$  — расстояние от резонатора до ножевой диафрагмы.

Подставляя в формулу (1) реальные параметры  $Y = 90$  мкм,  $\omega = 2,2 \cdot 10^{10}$  рад/с,  $\delta = 10$  мкм,  $L = 22$  см,  $\tau = 3$  с, получим для  $I_0 = 10^{-9}$  А,  $U_0 \approx 39$  мкВ. Заметим, что флуктуационное напряжение, возникающее на зазоре резонатора, при комнатной температуре равно  $\sim 93$  мкВ.

Известно [1], что средняя энергия резонатора, взаимодействующего с пучком электронов, увеличивается, т. е. резонатор нагревается на

$$\Delta T_\tau = \frac{eI_0 Q}{6kC\omega} \left( \frac{H}{Y} \right)^2, \quad (2)$$

где  $H$  — сечение пучка электронов при входе в резонатор,  $Q$  — добротность резонатора,  $C$  — емкость резонатора,  $k$  — постоянная Больцмана.

Подставляя экспериментальные данные в формулу (2), получим для  $I_0 = 10^{-9}$  А,  $\Delta T_\tau = 0,02$  К.

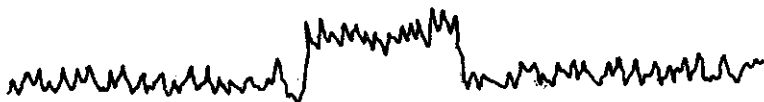


Рис. 3

Регистрировался калибровочный сигнал мощностью  $\sim 10^{-14}$  Вт. Так как КСВ линии на  $f_{рез}$  примерно равен 3, то поглощенная мощность равна  $\sim 7,5 \cdot 10^{-15}$  Вт. Запись сигнала представлена на рис. 3.

Обработка записи по методике [3] дала для флуктуационной чувствительности величину

$$\Delta T = (9,3 \pm 2,9) \text{ К},$$

что соответствует шумовой температуре

$$T_{\text{ш}} = (230 \pm 71) \text{ К}.$$

Наблюдалась зависимость чувствительности от размера пятна. Практически можно уменьшать размер пятна лишь до тех пор, пока оно не станет сравнимо с неровностями края ножевой диафрагмы.

Из формулы (1) видно, что достижение потенциальной чувствительности возможно при увеличении тока зонда до оптимальной величины, определяемой нагревом резонатора [1], при уменьшении размера пятна до 1 мкм и охлаждении резонатора до гелиевых температур.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов Ю. И., Колесов В. В. О чувствительности измерения энергии СВЧ резонаторов с помощью пучка электронов.— Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1978, 19, № 1, 14—18.
2. Wells O. C. Scanning Electron Microscopy. N. Y., 1974, 20—36.
3. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М., 1973.

Поступила в редакцию  
13.07.79