

## ШУМОВЫЕ СВОЙСТВА ТОЧЕЧНЫХ ТЕРМОПАР НА ОСНОВЕ КОНТАКТА МЕТАЛЛ-ПОЛУМЕТАЛЛ *BiSb* В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

### Часть 1

к.ф.-м.н. В.Т. Плаксий, к.ф.-м.н. О.Н. Сухоручко, к.ф.-м.н. А.П. Корецкий  
(представил д.ф.-м.н., проф. В.И. Карась)

*Приведены результаты аналитического и экспериментального исследования шумовых свойств термопар с точечным контактом металл-полуметалл *BiSb* в трехсантиметровом диапазоне длин волн.*

**Введение.** Высокая чувствительность, реализуемая с помощью супергетеродинных приемников, привела в настоящее время к их широкому распространению. Однако для ряда применений гетеродинный метод приема является нецелесообразным вследствие усложнения схемы (или из-за каких-либо других причин). В этих случаях широко используют детекторные приемники прямого усиления [1]. Такие приемники, снабженные входными усилителями, позволяют при высоком усилении входных каскадов полностью реализовать низкие значения коэффициента шума этих усилителей и обладают широкими полосами пропускания. Вследствие этого они находят широкое распространение в радиоастрономии и других областях [2].

Хотя СВЧ-детекторы не являются малозумящими приборами в обычном смысле этого понятия и не всегда являются входными устройствами, целесообразность улучшения их шумовых характеристик достаточно очевидна. В приемниках прямого усиления с невысоким предварительным усилением или без него улучшение качества детектора непосредственно приводит к улучшению чувствительности приемного устройства [3]. В приемниках с предварительным усилением выше порогового (т.е. в приемниках, где полностью реализуется чувствительность предварительного усилителя, и шум детектора не вносит вклада в эффективную шумовую температуру на входе) улучшение качества детектора приводит к возможности снижения коэффициента усиления предварительного усилителя. В современных высокочувствительных детекторных приемниках с предварительными усилителями пороговое усиление достаточно высоко (обычно 40 – 50 дБ) и возможность его снижения

весьма желательна для упрощения схемы [4]. В связи с этим весьма **актуальным** является как совершенствование технологии существующих детекторов, так и поиск новых типов детекторов СВЧ-излучения.

**Целью работы** является аналитическое и экспериментальное исследование шумовых свойств термопар с точечным контактом металл-полуметалл *BiSb*.

**1. Основной материал исследований.** Анализ механизма протекания тока через контакт металл-полуметалл показывает, что возможными источниками шумов контакта являются тепловые шумы активного сопротивления объема полуметалла и самого контакта, шумы, обусловленные флуктуациями термоэлектрического напряжения, а также шумы, возникающие за счет неравномерного прохождения носителей заряда через потенциальный барьер на границе металл-полуметалл.

Тепловой шум обусловлен хаотическим движением носителей заряда в объемном сопротивлении кристалла *BiSb* и активном сопротивлении контакта. Среднеквадратическое значение напряжения тепловых шумов, выделяющегося на согласованной нагрузке, определяется формулой Найквиста

$$\overline{U^2} = kT(r_k)\Delta fR,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T(r_k)$  – температура приконтактной области полуметалла;  $\Delta f$  – рассматриваемый частотный интервал;  $R$  – общее активное сопротивление контакта и объема кристалла *BiSb*.

Температура области кристалла, прилегающей к контакту металл-полуметалл, определяется как

$$T(r_k) = T_0 + \Delta T(r_k),$$

где  $T_0$  – температура кристалла в «бесконечно» удаленных от контакта точках;  $\Delta T(r_k)$  – превышение температуры кристаллической решетки в непосредственной близости от контакта, которое может быть определено через выделяющуюся на контакте мощность  $P$  следующим образом [2]:

$$\Delta T(r_k) = \frac{P}{4\pi\chi r_k};$$

$\chi$  – удельная теплопроводность *BiSb*;  $r_k$  – радиус контакта.

Ввиду малости объема, в котором происходит разогрев кристаллической решетки полуметалла, следует принимать во внимание также шум, обусловленный локальными (т.е. такими, которые захватывают области контакта намного меньшие, чем сам контакт) флуктуациями температуры решетки и дифференциальной термо-э.д.с.  $\alpha$ , которые приводят к флуктуациям термоэлектрического напряжения

$$\delta U_T = \delta(\alpha\Delta T).$$

Как известно [5], термо-э.д.с. состоит из контактной, возникающей из-за температурной зависимости контактной разности потенциалов между металлом и полуметаллом, обусловленной температурной зависимостью положения уровня химического потенциала в полуметалле, и объемной, возникающей за счет диффузии носителей заряда от «горячего» конца к «холодному». Высота потенциального барьера на контакте металл-полуметалл является также функцией температуры контакта  $T(r_k)$ , поэтому флуктуации  $T(r_k)$  в отдельных участках контакта будут вызывать флуктуации высоты потенциального барьера, что, в свою очередь, приводит к изменению контактного сопротивления металл-полуметалл. Если сопротивление контакта  $R_k$  обладает флуктуациями  $\delta R_k$  и через контакт протекает ток  $I$ , тогда в цепи возникает э.д.с. шума  $\delta U = I\delta R_k$ , среднее квадратическое значение которого равно [6]:

$$\overline{\delta U^2} = I^2 \overline{\delta R_k^2},$$

если сопротивление  $R_k$ , а также и  $\delta R_k$  не зависят от  $I$ .

Среднее квадратическое значение э.д.с. шумов точечного контакта металл-полуметалл *BiSb* определяется суммой всех составляющих

$$U_{\text{ш}}^2 = 4kT(r_k)\Delta fR + I^2 \overline{\delta R_k^2} + \overline{\delta(\alpha\Delta T)^2}. \quad (1)$$

Выразив значение  $\Delta T(r_k)$  и  $T(r_k)$  через  $I$  следующим образом:

$$\Delta T(r_k) = \frac{I^2 R_k}{4\pi X_{r_k}}; \quad (2)$$

$$T(r_k) = T_0 + \frac{I^2 R_k}{4\pi X_{r_k}} \quad (3)$$

и подставив значения (2) и (3) в уравнение (1), после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \overline{U_{\text{ш}}^2} = & 4kT_0\Delta fR + \frac{I^2}{4\pi X_{r_k}} \times \\ & \times \left[ R_k\Delta fR + (4\pi X_{r_k} + \alpha^2) \overline{\delta R_k^2} + R_k^2 \overline{\delta\alpha^2} + 2R_k\alpha \overline{\delta\alpha\delta R_k} \right]. \quad (4) \end{aligned}$$

Не вдаваясь в детальные вычисления флуктуаций сопротивления и термо-э.д.с. и считая их независимыми от тока  $I$ , а также оставляя вопрос о корреляции между этими флуктуациями, можно видеть, что среднее квадратическое значение э.д.с. шумов, а соответственно и относительная шумовая температура точечного контакта металл-полуметалл, пропорциональна квадрату тока, протекающего через контакт, и возрастает с увеличением  $R$ .

**2. Экспериментальные результаты.** Для измерения относительной шумовой температуры точечного контакта металл-полуметалл, экспериментальные образцы монтировались в корпусах стандартных смесительных диодов 3-см диапазона волн типа Д405. Измерения проводились в трехсантиметровом диапазоне длин волн при помощи измерительного приемника П5-10 с полосой пропускания  $\Delta f = 8$  МГц. На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости относительной шумовой температуры  $T_{ш}/T_0$  в «холодном» состоянии от величины тока смещения, протекающего через контакт металл-полуметалл *BiSb* для различных сопротивлений контакта.

Для измерения уровня шума диода в «горячем» состоянии на диод подавалась СВЧ мощность на частоте  $f_1$ , отличающейся от частоты  $f_2$ , на которую был настроен приемник П5-10 (рис. 2).

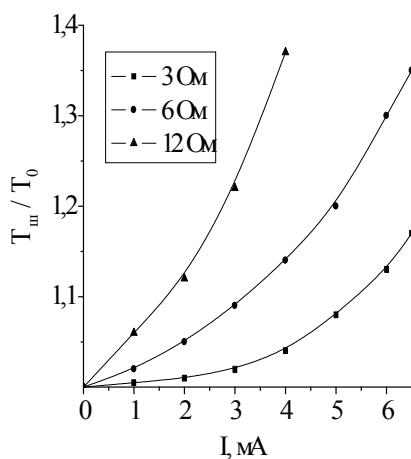


Рис. 1. Зависимость мощности шума диодов в «холодном» состоянии от тока смещения

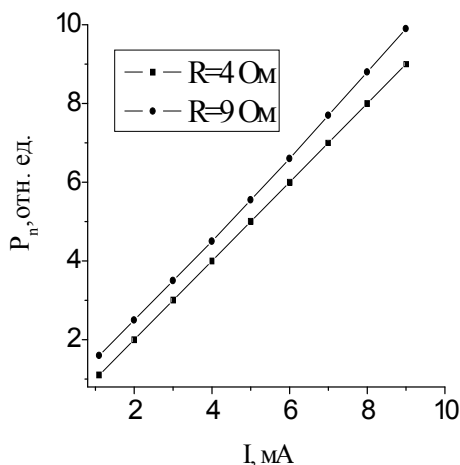


Рис. 2. Влияние тока смещения на мощность шума диодов, «разогретых» СВЧ-сигналом для различного сопротивления диодов

Постановка этого эксперимента основана на слабой зависимости параметров исследуемых диодов от частоты. Кроме того, при выборе  $f_1$  учитывалось условие, чтобы разность частот  $f_1 - f_2$  не соответствовала промежуточной частоте приемника. Из рис. 2 видно, что шум термоэлектрических диодов в «горячем» состоянии не является тепловым и зависит от тока смещения по закону  $I^\alpha$ , где величина  $\alpha$  принимает значения от 1,2 до 1,6.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Проведенные исследования относительной шумовой температуры точечного контакта металл-полуметалл показали, что шум термоэлектрических диодов в «горячем» состоянии не является тепловым, зависит от тока смещения и растет с увеличением сопротивления контакта. Направлением дальнейших исследований является определение характера шумового отношения  $t_{ш} = T_{ш}/T_0$  и определение его связи с величиной температуры приконтактной области.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дрягин Ю.А. Радиоприём // *Известия ВУЗов. Радиофизика.* – 1998. – Т. 41, № 11. – С. 1378 – 1384.
2. Плаксий В.Т., Прохоров Э.Д., Дядченко А.В., Мишнев А.А., Сухоручко О.Н. Геометрия контактов и ее влияние на чувствительность термоэлектрических детекторов СВЧ-излучения // *Вестник Сумского государственного университета, серия "Физика, математика, механика".* – 2003. – № 8 (54). – С. 28 – 37.
3. Hines M.E. Inherent Signal Losses in Resistive-Diode Mixers // *IEEE Trans.* – 1981. – MTT-29, № 4. – P. 281 – 292.
4. Plaksiy V.T., Sukhoruchko O.N., Yefimov B.P., Kasyanenko A.P. Account of Thermal Flow Through Metal-Semimetal BiSb contact Boundary for Determination of ENF Detector Volt-Watt Sensitivity // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves.* – 2002. – Vol. 23, № 4. – P. 645 – 650.
5. Стильбанс Л.С. Физика полупроводников. – М.: Сов. радио, 1967.– 422 с.
6. Белоусов А.П., Каменецкий Ю.А. Коэффициент шума. – М: Радио и связь, 1981. – 292 с.

Поступила 20.01.2005

**ПЛАКСИЙ Владимир Тихонович**, канд. физ.-мат. наук, доцент Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. В 1965 году окончил Харьковский государственный университет. Область научных исследований – радиофизика, физика полупроводников.

**СУХОРУЧКО Олег Николаевич**, канд. физ.-мат. наук, научн. сотр. ИРЭ НАН Украины. В 1987 году окончил Харьковский институт радиоэлектроники. Область научных исследований – физика приборов, элементов и систем, твердотельная электроника миллиметрового диапазона волн.

**КОРЕЦКИЙ Анатолий Павлович**, канд. физ.-мат. наук, старш. научн. сотр. ИРЭ НАН Украины. В 1974 году окончил Харьковский государственный университет. Область научных исследований – электродинамика открытых резонансных структур, генераторная и антенная техника миллиметрового диапазона волн.