

**ШУМОВЫЕ СВОЙСТВА ТОЧЕЧНЫХ ТЕРМОПАР  
НА ОСНОВЕ КОНТАКТА МЕТАЛЛ-ПОЛУМЕТАЛЛ  $BiSb$   
В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН  
Часть 2**

В.Т. Плаксий<sup>1</sup>, О.Н. Сухоручко<sup>2</sup>, А.П. Корецкий<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,  
<sup>2</sup>Институт радиофизики и электроники НАН Украины)

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

*термопара, СВЧ-диапазон, точечный контакт металл-полуметалл*

**Введение.** Проведенные и описанные в первой части статьи [1] 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. Дальнейшие исследования были связаны с определением характера шумового отношения  $t_{ш} = T_{ш}/T_0$  и определение его связи с величиной температуры приконтактной области.

На рис. 1 представлена зависимость мощности протектированного сигнала от тока смещения при разных уровнях мощности СВЧ, подаваемой на диод. Источником сигнала служил ГКЧ панорамного измерителя КСВН и ослабления типа Р2-65, работающий в диапазоне частот  $8,3 \div 12,5$  ГГц. Исследуемые диоды имели омическое сопротивление  $R = 9$  Ом. Частота сигнала равнялась 10 ГГц, а частота модуляции СВЧ сигнала была равна 100 кГц. Как видно из рис. 1, при токе смещения  $I = 3 - 5$  мА диоды имеют наибольшую чувствительность.

Для исследования низкочастотного шума диодов была собран измерительный стенд, аналогичный описанному в работе [2]. Он состоял из двух идентичных высокостабильных кварцевых генераторов с умножителями частоты, двух вентилях, двух аттенюаторов, предварительного малощумящего усилителя и частотомера типа ЧЗ-54. На исследуемые диоды подавались СВЧ квазимонохроматические сигналы, затем, после смешивания, сигнал биений генераторов усиливался и частотомером измерялась кратковременная нестабильность частоты сигнала биений.

Согласно [2], метод анализа кратковременной нестабильности частоты генераторов, применяемых в схемах сравнения, можно также использовать для определения флуктуационных характеристик смесителей при условии, что вклад шума смесителя превышает влияние шумов генераторов измерительного устройства на кратковременную нестабильность частоты сигнала биений генераторов. Это условие практически выполняется соответствующим выбором частоты биений генераторов стабильных сигналов [3], а информация об избыточном шуме смесительного диода получается путем сравнения собственной кратковременной нестабильности частоты сигнала на выходе смесителя.

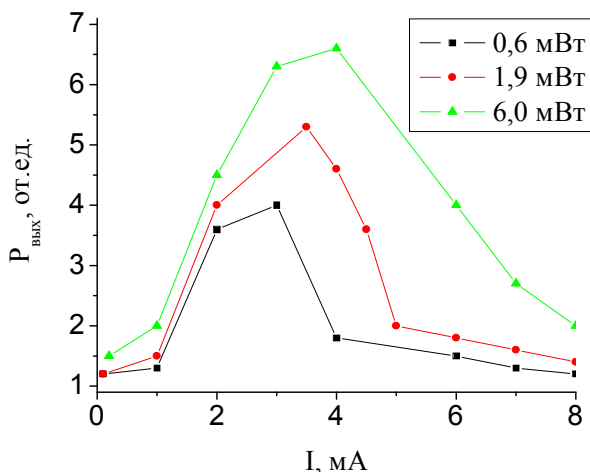


Рис. 1 Зависимость мощности выходного сигнала от тока смещения при разных уровнях входной мощности

Соотношение между спектральной плотностью фазовых флуктуаций и параметрами, характеризующими избыточный шум в полупроводниковом смесителе, имеет следующий вид [2,3]

$$S_{\varphi}(\omega) = \frac{A}{\omega^{\beta} 2P_c}, \quad (5)$$

где  $A$  и  $\beta$  – постоянные, определяемые режимом работы и типом смесителя;  $P_c$  – мощность сигнала на выходе образцовых генераторов.

Для диодов типа Д 405 при  $P_c = 10^{-3}$  Вт  $A$  принимает значения  $10^{-14} - 10^{-15}$  Вт,  $\beta \approx 1$ . Вклад избыточного шума полупроводникового диода в оценку кратковременной нестабильности частоты сигнала биений определяется следующим образом [4]:

$$\frac{\delta[\langle\varphi(t)\rangle_\tau]}{\omega_0} = \left( \frac{1}{\omega_0^2} \cdot \int_0^{\omega_b} \frac{A\varphi^{2-\beta}}{2P_c} d\omega \right)^{1/2} = \left[ \frac{A}{(3-\beta)2P_c\omega_0^2} \cdot \left(\frac{\pi}{2\tau}\right)^{3-\beta} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где символ  $\langle \dots \rangle_\tau$  означает усреднение сигнала биений на выходе смесителя за выборочный интервал времени  $\tau$ ;  $\omega_0$  – частота биений образцовых генераторов;  $\omega_b$  – верхняя граничная частота фильтра нижних частот схемы измерения кратковременной нестабильности частоты сигнала биений генераторов.

Погрешность измерительной аппаратуры определялась собственной кратковременной нестабильностью частоты кварцевых генераторов с умножителями частоты, которая на частоте 9,5 ГГц была не хуже  $10^{-9}$  за  $\tau = 1$  с.

На рис. 2 представлены типовые значения величины  $\delta[\langle\varphi(t)\rangle_\tau]/\omega_0$  в зависимости от мощности сигналов образцовых генераторов при  $\tau = 1$  с. Видно, что ход экспериментальных кривых не противоречит эмпирическому соотношению (5).

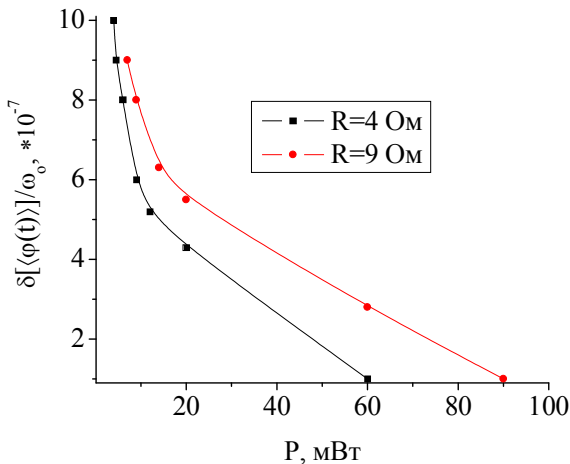


Рис. 2. Зависимости избыточного шума диодов от СВЧ мощности

Для нахождения параметров  $A$  и  $\beta$  определялась зависимость функции  $\delta[\langle\varphi(t)\rangle_\tau]/\omega_0$  от  $\tau$  (рис. 3).

Величина коэффициента  $\beta$  рассчитывалась по наклону прямой, характеризующей логарифмическую зависимость функции  $\delta[\langle\varphi(t)\rangle_\tau]/\omega_0$  от  $\tau$ . Было найдено, что для диодов на основе  $Bi_{90}Sb_{10}$  коэффициент  $A$  принимает значения  $1,3 \times 10^{-12} - 8,4 \times 10^{-11}$  Вт, а коэффициент  $\beta$  изменяется в пределах 1,1 – 1,4.

Существенным отличием низкоомных термоэлектрических детекторов от обычных точечных смесителей [4, 5] является то, что коэффициент  $\beta$  зависит от мощности сигнала, подаваемого на диод. Этот эффект в той или иной степени наблюдался во всех экспериментальных образцах.

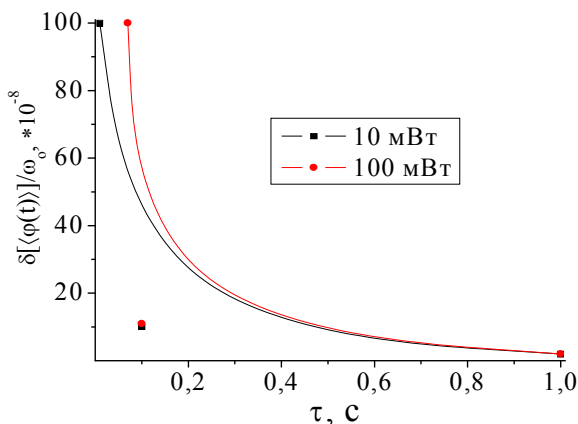


Рис. 3. Зависимости избыточного шума диодов от времени усреднения  $\tau$

Одна из причин, объясняющих это явление, заключается в возможном влиянии флуктуаций величины термо-ЭДС на избыточный шум смесителя. Рис. 4 иллюстрирует зависимость избыточного шума термоэлектрических смесителей от тока смещения.

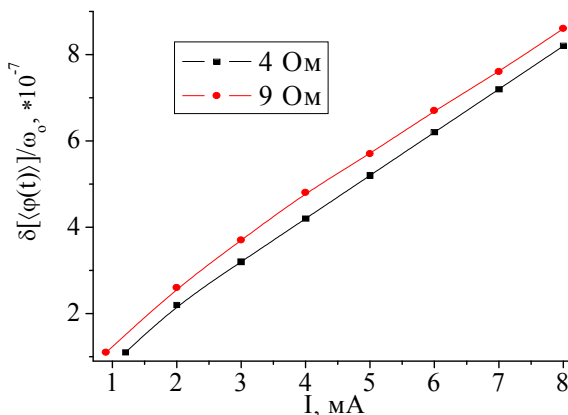


Рис. 4. Зависимость избыточного шума смесителей от тока смещения

Согласно этим данным, избыточный шум диодов на основе металл-полуметалл возрастает пропорционально  $I^\gamma$ , где  $\gamma \approx 1,8$ . Исследуемые

диоды имели разброс по омическому сопротивлению (от 4 до 9 Ом), но зависимость избыточного шума от их внутреннего сопротивления по постоянному току в ходе эксперимента обнаружить не удалось.

Как показали измерения на одних и тех же образцах через интервал времени примерно в полгода, значения приведенных параметров термоэлектрических детекторов на основе  $Bi_{90}Sb_{10}$  воспроизводились в пределах погрешности измерительной установки. Детекторы работали и хранились при комнатной температуре.

**Выводы.** Проведенные исследования по измерению шумовых свойств точечных термопар на основе контакта металл-полуметалл  $BiSb$  показали, что шумовое отношение  $t_{ш} = T_{ш}/T_0$  имеет нелинейный характер, близкий к квадратичному, и относительная шумовая температура растет с увеличением сопротивления контакта. Следует отметить, что отклонение зависимости  $T_{ш} / T_0 = f(I)$  от квадратичной более сильное у контактов с большим сопротивлением и по порядку величины неплохо согласуется с величиной температуры приконтактной области, определенной в [6]. Результаты измерений низкочастотного шума показали, что преобладающим является фликкер-шум с  $\beta = 1,1 - 1,4$ , причем величина этого коэффициента зависит от мощности, подаваемой на прибор.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Плаксий В.Т., Сухоручко О.Н., Корецкий А.П. Шумовые свойства точечных термопар на основе контакта металл-полуметалл  $BiSb$  в СВЧ-диапазоне длин волн. Ч. 1 // Системы обработки информации. – Х.: XV ПС. – 2005. – Вып. 1 (41). – С. 156 – 160.
2. Иванов Н.И. Измерение избыточного шума полупроводниковых диодов // Труды метрологических институтов СССР. – 1981. – № 7. – С. 310 – 316.
3. Иванов Н.И., Кравченко В.Ф. Флюктуации в квантовом стандарте частоты // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1981. – № 7. – С. 890 – 895.
4. Hines M.E. Inherent Signal Losses in Resistive-Diode Mixers // IEEE Trans. – 1981. – MTT-29, N4. – P. 281 – 292.
5. Дрягин Ю.А. Радиоприём // Известия ВУЗов, Радиофизика. – 1998. – Т.41, №11. – С. 1378 – 1384.
6. 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 EHF Detector Volt-Watt Sensitivity // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2002. – Vol. 23, № 4. – P. 645 – 650.

Поступила 28.02.2004

**Рецензент:** доктор физико-математических наук, профессор В.И. Карась,  
Харьковский университет Воздушных Сил.