

В. Т. ПЛАКСИЙ, канд. физ.-мат. наук, В. М. СВЕТЛИЧНЫЙ, канд. физ.-мат. наук, В. А. ШАЛАЕВ, канд. физ.-мат. наук, А. В. ДЯДЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДИКАТОРОВ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУМЕТАЛЛОВ. ЧАСТЬ I. ВОЛЬТ-ВАТТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

При всем многообразии решаемых с помощью техники СВЧ-задач в большинстве случаев любое использование СВЧ-излучения сводится к генерации сигнала, имеющего необходимые параметры, и его обнаружению после прохождения определенного тракта. Основными типами индикаторов СВЧ-излучения являются различные тепловые приборы: термисторы, болометры, термопары и полупроводниковые кристаллические детекторы с  $p-n$ -переходами.

Ценным свойством тепловых приборов [1] является возможность не только регистрировать с их помощью наличие сигнала, но и с большой степенью точности измерять его мощность. Возможно также проведение абсолютных измерений, что делает такие приборы эталонами при градуировке других типов индикаторов. Вместе с тем, поскольку работа тепловых индикаторов связана с нагревом довольно массивного рабочего тела, они имеют сравнительно невысокую чувствительность и большую инерционность.

Кристаллические полупроводниковые детекторы с  $p-n$ -переходами широко применяются для индикации слабых быстропеременных СВЧ-сигналов [2]. Общий принцип их работы состоит в выпрямлении тока на границе полупроводников  $p$ - $n$ -типов. Характерной особенностью полупроводниковых детекторов с  $p-n$ -переходами является зависимость их параметров от температуры и условий внешней среды.

Индикаторы СВЧ-излучения, использующие эффекты разогрева носителей заряда, могут регистрировать короткие импульсы высокочастотной мощности и выделять их огибающую, так как эффекты разогрева электронов имеют малую инерционность. Второе свойство приборов — их высокая чувствительность, обусловленная тем, что поглощенная мощность идет на увеличение энергии электронной системы, теплоемкость которой на несколько порядков меньше, чем у кристаллической решетки. Третья особенность приборов с горячими носителями заключается в том, что эффекты, лежащие в основе их действия, объемны. Приборы с горячими носителями более устойчивы к воздействию климатических

условий. Отсутствие сосредоточенных элементов в индикаторах с горячими носителями заряда значительно улучшает их частотный диапазон, определяемый интервалом частот, в котором осуществляется эффективный разогрев электронного газа.

Для индикации малых уровней СВЧ-мощности Гаррисон и Цукер предложили прибор, в котором используется неоднородный разогрев электронного газа вблизи невыпрямляющего контакта малой площади. В работах [3; 4] описаны тепловые индикаторы СВЧ-излучения, где используется обычный термоэлектрический эффект в полуметаллах — сплавах висмута с сурьмой. Принцип действия таких индикаторов основан на возникновении градиента температуры кристаллической решетки в объеме полуметалла при протекании через него СВЧ-тока и соответствующего термоэлектрического напряжения, которое является мерой поглощения СВЧ-мощности. По принципу действия они не отличаются от точечно-контактных индикаторов с горячими носителями. Чувствительность в таких приборах повышается в результате уменьшения объема, в котором происходит эффективный разогрев полуметаллического кристалла, а увеличение быстродействия достигается с помощью хорошего теплоотвода в полуметаллический кристалл.

Рассмотрим основные характеристики индикаторов СВЧ-излучения на основе полуметаллов [4]. Тепловые индикаторы электромагнитного излучения характеризуются основными параметрами: вольт-ваттной чувствительностью или коэффициентом преобразования, среднеквадратичным значением шума и связанной с ним пороговой чувствительностью, инерционностью, сопротивлением, номинальной мощностью, допустимой перегрузкой, КПД, спектральной чувствительностью.

Вольт-ваттная чувствительность или коэффициент преобразования  $\beta$  в общем случае определяется отношением напряжения выходного сигнала  $U_T$  к падающему потоку мощности электромагнитного излучения  $P$ :  $\beta = dU_T/dP$ .

Вольт-ваттная чувствительность индикатора на основе полуметаллов для различных моделей контакта металл — полуметалл представляется следующим образом [4].

1. Рассматриваем полуограниченный кристалл, в который вплавлен металлический полусферический контакт. Считаем, что тепловой поток через контакт металл — полуметалл отсутствует. Тогда  $\beta = \alpha/4\pi\kappa_0 r_k$  (1), где  $\alpha$  — дифференциальная термоЭДС;  $\kappa_0$  — коэффициент теплопроводности полуметалла;  $r_k$  — радиус контакта. Для сплава  $V_{96}Sb_{10}$  при комнатной температуре  $\kappa_0 = 7,0 \times 10^{-4}$  Вт·град $^{-1}$ ·м $^{-1}$ ,  $\alpha = -0,85$  В·град $^{-1}$ . Если радиус контакта равен  $(2-3) \cdot 10^{-6}$  м, вольт-ваттная чувствительность составляет  $(0,3-0,5)$  В/Вт.

2. Для предельного случая, когда вся поглощаемая индикатором мощность выделяется в бесконечно тонком слое полуметалла вблизи контакта металл — полуметалл, имеем  $\beta = \frac{\alpha}{2\pi\kappa_0 r_k}$  (2).

3. С учетом теплового потока через границу контакта металл — полуметалл получаем

$$\beta = \frac{\alpha}{4\pi\kappa_0 r_k} \frac{1}{1 + \delta_0} \delta_0 = \frac{\kappa_3}{\kappa_0} \frac{r_k \omega \operatorname{cth} \omega l}{2} \quad (3)$$

Здесь  $\delta_0$  — функция потерь теплоты для полусферического контакта

металл — полуметалл;  $\kappa_3$  — коэффициент теплопроводности металлического контакта;  $l$  — его длина.

Для случая, когда металлический зонд выполнен из Ag-проволочки,  $\delta_0 = 0,22$  и вольт-ваттная чувствительность контактов металл — полуметалл с учетом теплоотвода в серебряный зонд уменьшается на 18 %.

4. Необходимо учесть геометрию контактов. Если они выполнены в форме сплюснутого эллипсоида вращения,

$$\beta = \frac{\alpha}{4\pi\kappa_0 r_k} \frac{1}{\delta_0 + \frac{1}{f(c)}}, \quad (4)$$

где  $f(c)$  — поправочная функция на форму контакта металл — полу-

металл,  $f(c) = \frac{\operatorname{arccctg} \frac{c}{\sqrt{1-c^2}}}{\sqrt{1-c^2}}$ ;  $c$  — отношение глубины проплавления контакта к радиусу контакта металл — полуметалл,  $c = h/r_k$ . При контактах в виде вытянутого эллипсоида вращения

$$\beta = \frac{\alpha}{4\pi\kappa_0 r_k} \frac{1}{\delta_0 + \frac{1}{F(c)}}, \quad (5)$$

где  $F(c)$  — поправочная функция исходя из формы контакта металл —

полуметалл,  $F(c) = \frac{1}{2\sqrt{c^2-1}} \ln \frac{c + \sqrt{c^2-1}}{c - \sqrt{c^2-1}}$ .

Учет формы контакта металл — полуметалл показывает, что вольт-ваттная чувствительность контактов в виде сплюснутого эллипсоида вращения возрастает до 15 %.

Из анализа выражений (1) — (5) следует, что увеличивать чувствительность индикаторов СВЧ-излучения на основе полуметалла можно подбором сплава  $Bi_{1-x}Sb_x$  с таким процентным содержанием Sb, при котором значение  $\alpha$  будет максимальным или % минимальным, либо выбором геометрии контакта металл — полуметалл.

Расчет  $\beta$  показывает, что этим условиям удовлетворяет плоская геометрия контакта металл — полуметалл.

Исследование влияния смещения по постоянному току на вольт-ваттную чувствительность индикаторов СВЧ-излучения представляет определенный интерес, так как при изменении направления постоянного тока через контакт металл — полуметалл выходное напряжение  $U_T$  в одном случае увеличивается, в другом уменьшается, достигая минимума, а затем вновь возрастает с изменением полярности выходного сигнала, как это показано на рисунке. Здесь положительному направлению тока соответствует приложенное постоянное внешнее напряжение смещения « $\leftarrow$ » — металл, « $\rightarrow$ » — полуметалл.

Решение уравнения теплопроводности для модели в виде полусферического контакта металл — полуметалл с учетом того, что

наряду с термоэлектрическим напряжением, пропорциональным поглощенной СВЧ-мощности, возникает дополнительное термоэлектрическое напряжение за счет эффектов Пельтье и Томсона, следующее:

$$U_T = \frac{\alpha}{2\pi x_{0r}} (P \pm 2I_{cm}\alpha T). \quad (6)$$

Здесь  $U_T$  — регистрируемое термоэлектрическое напряжение;  $I_{cm}$  — ток смещения;  $T$  — температура контакта.

Из соотношения (6) следует, что чувствительность  $\beta = dU_T/dP$  не зависит от тока смещения, подаваемого на контакт металл —

полуметалл. Вместе с тем эксперименты показывают, что чувствительность таких индикаторов зависит от тока смещения, что ясно из рисунка, где показана зависимость  $u_T = f(I_{cm})$  при  $P = \text{const}$ . Такую зависимость можно объяснить изменением высоты потенциального барьера контакта металл — полуметалл, влиянием тепловых эффектов Пельтье и Томсона и, наконец, изменением сопротивления контакта металл — полуметалл при воздействии мощности СВЧ-сигнала и постоянного тока, которое в приведенных расчетах не учитывалось. В этом случае прибор работает в гибридном режиме: на его выходе регистрируется термоэлектрическое напряжение, появляющееся вследствие неоднородного разогрева полуметаллического кристалла, и болометрическое напряжение.

**Список литературы:** 1. Приемники инфракрасного излучения / Ж. Шоль, И. Морфан, М. Мюнш. — М.: Мир, 1969. — 256 с. 2. Полупроводниковые диоды. Параметры, методы, измерения / Под. ред. Н. Н. Горюнова, Ю. Р. Носова. — М.: Сов. радио, 1968. — 304 с. 3. Плаксий В. Т. Исследование детектирующих свойств контактов металл — полуметалл: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Х., 1974. — 146 с. 4. Плаксий В. Т., Светличный В. М. Электрофизические свойства полуметаллов. — Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. — 96 с.

Поступила в редколлегия 14.05.85.