

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН ТОЧЕЧНОЙ ТЕРМОПАРЫ МЕТАЛЛ-ПОЛУМЕТАЛЛ $BiSb$

*В.Т. Плакий\**, канд. физ.-мат. наук, доц.;

*А.В. Дядченко\**, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.;

*В.А. Шалаев\**, канд. физ.-мат. наук, доц.;

*О.Н. Сухоручко\*\**, канд. физ.-мат. наук; *И.О. Белоус\**

\*Харьковский Национальный Университет им. В.Н. Каразина

\*\*Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованию электрофизических свойств полуметаллов, в особенности висмута и сурьмы, посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Вместе с тем явления, возникающие при протекании электрического тока через контакты металл-полуметалл, изучены недостаточно. Определенный интерес представляют процессы протекания тока через точечные контакты металл-полуметалл  $BiSb$  в связи с использованием этих контактов для детектирования и измерения малых уровней непрерывной и импульсной мощности СВЧ-сигналов [1]. В частности, представляет интерес исследование пробойных явлений в таких контактах, поскольку эти явления определяют максимально допустимую мощность, подаваемую на детекторы, использующие эти контакты. Вопрос об определении максимально допустимой СВЧ-мощности (вместе с минимально обнаруживаемой мощностью) определяет динамический диапазон приборов рассматриваемого типа.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ранее изложены результаты экспериментальных исследований вольт-амперной характеристики (ВАХ) точечных контактов висмут-висмут ( $Bi-Bi$ ), точечных контактов металл-полуметалл  $BiSb$  с различным процентным содержанием  $Sb$  в  $Bi$ , сэндвич-структур  $Bi-Bi_2O_3-Bi$  при комнатных и низких температурах [2-5]. На ВАХ наблюдались участки отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), причем во всех случаях S-типа (рис. 1). Авторы указанных работ различным образом объясняют данные экспериментальных исследований. В [2] появление ОДС на ВАХ объясняется плавлением материала в приконтактной области вследствие ее разогрева протекающим через контакт  $Bi-Bi$  током. Исследования ВАХ у полупроводников монокристаллических сплавов  $Bi_{1-x}Sb_x$  ( $x = 0,065-0,22$ ) при температуре 4,2 К в электрических полях до 30 В/см показали, что основной причиной возрастания проводимости образцов может быть межзонный пробой [3].

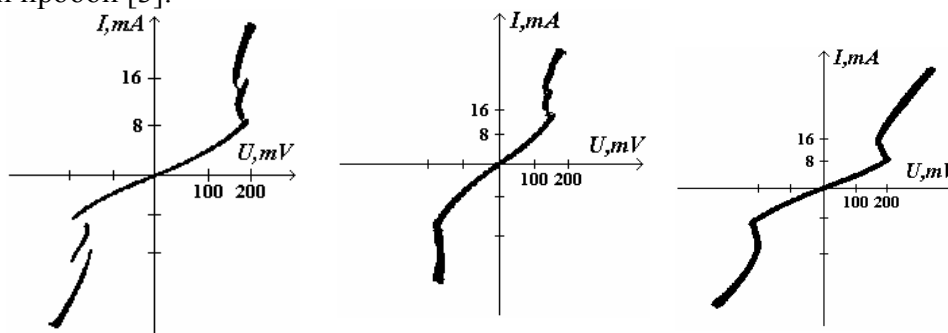


Рисунок 1 - Типичные ВАХ точечной термопары металл-полуметалл  $BiSb$

На совершенных по кристаллической структуре образцах в условиях межзонного пробоя наблюдались S-образные ВАХ. Однако однозначно условия возникновения на ВАХ участка с ОДС не установлены. Одной из причин возникновения S-образной ВАХ в

условиях межзонного пробоя может быть уменьшение эффективности рассеяния с увеличением концентрации носителей заряда и при увеличении экранировки потенциалов рассеяния [3]. В работе [4] приведены результаты исследования пробоя точечных контактов металл-полуметалл  $Bi_{1-x}Sb_x$  ( $x = 0; 0,1; 0,15$ ) при 300 К и 77 К. Показано, что качественно картина пробоя не зависит ни от материала контактного зонда (металла), ни от состава  $BiSb$  (полуметалла). Изменение температуры до 77 К приводило к увеличению нелинейности ВАХ в предпробойной области и углублению участка ОДС. На ВАХ наблюдались два устойчивых и воспроизводимых участка ОДС, что указало на электрическую природу пробоя. Определяющей величиной при возникновении пробоя, как свидетельствуют результаты работы [4], является разность потенциалов, приложенная к контакту. Межзонный пробой в этом случае возможен при возбуждении носителей заряда и переходе их из одной энергетической зоны в другую. В работе [5] появление ОДС на ВАХ объясняется пробоем барьерного слоя и туннельными эффектами, но при этом должна была наблюдаться существенная зависимость пробойного напряжения от высоты потенциального барьера. Барьерный слой образуется и на точечных контактах металл-полуметалл  $BiSb$ , однако существенной зависимости пробойного напряжения от работы выхода металла при одном и том же составе полуметалла  $BiSb$  не обнаружено [4]. На ВАХ контактов металл-полуметалл не наблюдаются характерные для контактов металл-полупроводник прямая и обратная ветви [6]. ВАХ контактов металл-полуметалл до пробойной области остается практически всегда линейной [7]. При 300 К концентрация свободных носителей заряда в  $BiSb$  составляет  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, толщина барьерного слоя порядка  $10^{-5}$  см, поэтому носители заряда могут туннелировать через барьер. Целью статьи является аналитическое исследование участков ОДС на ВАХ и динамического диапазона термоэлектрических детекторов с точечным контактом металл-полуметалл  $BiSb$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Так как барьерный слой в контактах металл-полуметалл *BiSb* не оказывает существенного влияния на процесс протекания тока, возможен другой тип электрического пробоя таких контактов, а именно пробой в результате ускорения носителей заряда на длине свободного пробега. На границе металл-полуметалл все напряжение, приложенное к контакту, падает на сопротивлении растекания объема полуметалла, и в приконтактной области полуметалла создается сильное поле (порядка  $4 \cdot 10^2$  В/см). В электрическом поле за время свободного пробега носители заряда получают дополнительную энергию, достаточную для возбуждения дополнительных носителей, что вызывает электрический пробой. Из решения уравнения Лапласа для контакта с полусферической геометрией следует, что, зная распределение поля

$$E(r) = U_0 r_k / r, \quad (1)$$

где  $U_0$  – приложенное напряжение,  $r_k$  – радиус контакта, и длину свободного пробега  $l$  носителей заряда в полуметалле, можно определить добавочную к средней тепловой энергию, получаемую носителем в поле<sup>^</sup>

$$E_{\text{доп}} = qU_0 l / (r_k + l). \quad (2)$$

Если  $l > r_k$ , то

$$E_{\text{доп}} = qU_0, \quad (3)$$

практически вся разность потенциалов, приложенная к контакту, используется на ускорение носителей заряда в течение времени свободного пробега.

Условие возникновения пробоя

$$E_{\text{доп}} \geq \Delta E, \quad (4)$$

где  $\Delta E$  – расстояние между подходящими для возбуждения дополнительных носителей заряда зонами.

Следовательно, условие пробоя (минимальное напряжение пробоя)

$$U_{\text{проб}} = \Delta E / q. \quad (5)$$

Максимально допустимая мощность рассеивания контактом металл-полуметалл

$$P_{\text{макс}} = U_{\text{проб}}^2 / R = \left( \frac{\Delta E}{q} \right)^2 / R, \quad (6)$$

где  $R = \rho / 2\pi r_k$  – сопротивление контакта;  $\rho$  – удельное сопротивление приконтактной области полуметалла.

Динамический диапазон по мощности термопары вычисляется как логарифм отношения максимальной мощности, которую способен рассеивать прибор, к максимально обнаруживаемой:

$$L = 10 \lg (P_{\text{макс}} / P_{\text{мин}}). \quad (7)$$

При определении  $P_{\text{мин}}$  следует учесть результаты работы [5], в которой экспериментально показано, что основным типом шумов в приборах на основе точечного контакта металл-полуметалл *BiSb* является тепловой шум активного сопротивления прибора

$$U_{ш}^2 = 4kT_0R\Delta f, \quad (8)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана;  $T_0$  – температура;  $R$  – сопротивление прибора;  $\Delta f$  – полоса частот.

Если напряжение шумов равно полезному сигналу, то минимальная мощность определится из условия

$$\overline{(U_{ш}^2)}^{1/2} = \beta_0 P_{мин} = \alpha P_{мин} / 4\pi\chi_0 r_k, \quad (9)$$

где  $\beta_0 = \alpha / 4\pi\chi_0 r_k$  - чувствительность прибора;  $\alpha$  - дифференциальная термо-ЭДС *BiSb*;  $\chi_0$  – удельная теплопроводность *BiSb*.

Таким образом,

$$P_{мин} = \overline{(U_{ш}^2)}^{1/2} / \beta_0, \quad (10)$$

$$L = 10 \lg \left[ \left( \frac{\Delta E}{q} \right)^2 \cdot \frac{\alpha}{4\pi f \rho (kT_0 \rho \Delta \chi_0 / 2\pi r_k)^{1/2}} \right]. \quad (11)$$

Расчет  $L$  как функции параметров материала *BiSb* и радиуса контакта металл-полуметалл показывает, что при изменении  $r_k$  от  $3 \cdot 10^{-6}$  м до  $9 \cdot 10^{-6}$  м  $L$  изменяется от 56,8 до 58,8 дБ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа результатов исследования ВАХ точечных контактов металл-полуметалл *BiSb* следует, что устойчивые и воспроизводимые при комнатной температуре участки ОДС на ВАХ имеют природу электрического пробоя в результате ускорения носителей заряда на длине свободного пробега. Динамический диапазон по мощности определяется электрофизическими свойствами полуметалла висмут-сурьма и конструктивными особенностями термоэлектрического детектора.

## SUMMARY

*Results of the analytical investigation of the negative differential resistance and dynamic range of the point thermocouple metal-semimetal BiSb are presented.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.T. Plaksy, V.M. Svetlichny, O.N. Sukhoruchko, V.A. Solodovnic. Bismuth-antimony alloys and their application in microwave engineering // The Fourth International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves". - Kharkov, June 4-9 2001. - Vol. 1. - P. 331-332.
2. Rahman A., Mahanta R. Negative resistance of Bi-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Bi sandwich structure // Indian J. Pure and Appl. Phys. – 1976. – Vol.14, № 12. – P. 144-147.
3. Межзонный пробой и пинч-эффект в сплавах висмут-сурьма / И.Б. Брандт, Е.А. Свистова, Е.А. Свистов, Г.Д. Яковлев // Журн. эксперим. и теор. физики. – 1971. – Т.61, №3. – С. 1078-1082.
4. Плаксий В.Т., Светличный В.М. Пробойные явления в точечных контактах металл-полуметалл // Лит. физ. сб. – 1974. – Т.14, № 4. – С. 686-687.
5. Gayley R. Non-ohms behaviour in stationary bismuth contacts // J. Appl. Phys. – 1970. – Vol.41, №13. – P. 5348-5350.
6. В.Т. Плаксий, О.Н. Сухоручко, А.П. Касьяненко, Б.П. Ефимов. Вольт-амперная характеристика точечных контактов металл-полуметалл *BiSb* // Вісник Харківського національного університету. Серія Радіофізика та електроніка. – 2002. - № 1 (544). - С. 164-166.
7. В.Т. Плаксий, Э.Д. Прохоров, А.В. Дядченко, В.А. Шалаев, О.Н. Сухоручко. Генерация электромагнитных колебаний в контактах металл-полуметалл *BiSb* // Вісник Харківського Національного Університету. Серія Радіофізика та електроніка. – 2004. - № 1 (622). - С. 23-25.

*Поступила в редакцию 29 ноября 2004 г.*