

УДК 621.382

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

**ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
НА ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ИНДИКАТОРОВ
СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТОЧЕЧНОГО КОНТАКТА
МЕТАЛЛ — ПОЛУМЕТАЛЛ**

В твердотельной электронике широко используются контактные явления в различных переходах (электронно-дырочном, металл — полуметалл).

Внимание исследователей привлекают полуметаллы, представителями которых являются висмут, сурьма и их сплавы. Эти материалы по своим электрофизическим свойствам занимают промежуточное положение между типичными полупроводниками и металлами. Интерес к этому классу твердых тел обусловлен несколькими причинами. Во-первых, полуметаллы обладают своеобразной структурой энергетических зон, что определяет интересные электрофизические свойства этих материалов: большую подвижность носителей заряда и их малую концентрацию, резкую анизотропию многих кинетических коэффициентов и ряд других. Во-вторых, слабое перекрытие валентной и свободной зон, характерное для полуметаллического состояния, позволяет управлять взаимным расположением зон многими воздействиями — магнитным полем, давлением, легированием различными примесями. Полуметаллы перспективны с точки зрения возможного их применения в различных приборах и устройствах. Уже сейчас полуметаллические сплавы висмут — сурьма находят широкое применение в термоэлектрических генераторах и холодильниках. Они удобны при изучении распространения электромагнитных волн в твердотельной плазме. Полуметаллы являются также перспективными материалами для низкотемпературной электроники.

Исследованию зонной структуры и электрофизических свойств полуметаллов, в особенности висмут — сурьма, посвящено большое количество работ советских 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 в связи с тем, что такие контакты можно использовать для детектирования СВЧ-сигналов и измерения малых уровней непрерывной и импульсной мощности [6].

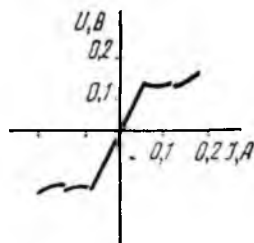
В частности, представляет интерес исследование пробойных явлений в таких контактах, поскольку эти явления определяют максимально допустимую мощность, подаваемую на детекторы, использующие такие контакты. Вопрос об определении максимально допустимой подаваемой СВЧ-мощности (вместе с минимально обнаруживаемой мощностью) определяет динамический диапазон приборов рассматриваемого типа.

Рассмотрим результаты исследования пробойных явлений в точечных контактах металл — полуметалл и определения динамического диапазона индикаторов СВЧ-излучения, использующих свойства таких контактов.

Ранее изложены результаты экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) точечных контактов висмут — висмут (Bi-Bi), точечных контактов металл—полуметалл BiSb с различным процентным содержанием Sb в Bi , сэндвич—структур $\text{Bi-Bi}_2\text{O}_3\text{-Bi}$ при комнатных и низких температурах

[1—4]. На ВАХ наблюдались участки отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), причем во всех случаях наблюдались S-образные ВАХ. Типичная ВАХ представлена на осциллограмме (рисунок).

Авторы указанных работ различным образом объясняют данные экспериментальных исследований. В [4] появление ОДС на ВАХ объясняется плавлением материала в приконтактной области вследствие ее разогрева протекающим через контакт V_i-V_i током. Исследования ВАХ у полупроводниковых 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 [2]. 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 [2]. В работе [3] 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 контактной проволоочки (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. Авторы работы [3] детально исследовали первый участок ОДС на ВАХ. Определяющей величиной при возникновении пробоя, как свидетельствуют результаты работы [3], 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 [1] 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 контактах металл — полуметалл $BiSb$, однако существенной зависимости пробойного напряжения от работы выхода металла при одном и том же составе полуметалла $BiSb$ не обнаружено [3; 6]. На ВАХ контактов металл — полупроводник прямая и обратная ветви. ВАХ контактов металл — полуметалл до пробойной области остается практически всегда линейной. При 300 К концентрация свободных носи-

телей заряда в BiSb составляет 10^{18} см⁻³, толщина барьерного слоя порядка 10^{-5} см, поэтому носители заряда могут туннелировать через барьер.

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 при контактной 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 $E(r) = U_0 r_k / r$ (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 $\mathcal{E}_{\text{доп}} = qU_0 l / (r_k + l)$ (2). Если $l > r_k$, то $E_{\text{доп}} = qU_0$ (3), практически вся разность потенциалов, приложенная к контакту, используется на ускорение носителей заряда в течение времени свободного пробега. Условие возникновения пробоя $\mathcal{E}_{\text{доп}} \geq \Delta \mathcal{E}$ (4). Здесь $\Delta \mathcal{E}$ — расстояние между подходящими для возбуждения дополнительных носителей заряда зонами. Следовательно, условие пробоя (минимальное напряжение пробоя) $U_{\text{проб}} = \Delta \mathcal{E} / q$ (5). Максимально допустимая мощность рассеивания кон-

тактом металл — полуметалл $P_{\text{макс}} = U_{\text{проб}}^2 / R = \left(\frac{\Delta \mathcal{E}}{q}\right)^2 / R$ (6), где

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

Определим динамический диапазон по мощности индикаторов СВЧ-излучения на основе точечного контакта металл — полуметалл BiSb. Динамический диапазон вычисляется как логарифм отношения максимальной мощности, которую способен рассеивать прибор, к максимально обнаруживаемой $L = 10 \lg (P_{\text{макс}} / P_{\text{мин}})$ (7). При определении $P_{\text{мин}}$ следует учесть результаты работы [5], в которой экспериментально показано, что основным типом шумов в приборах на основе контактов металл — полуметалл BiSb является тепловой шум активного сопротивления прибора $U_{\text{ш}}^2 = 4kT_0 R \Delta f$ (8). Здесь k — постоянная Больцмана; T_0 — температура; R — сопротивление прибора; Δf — полоса частот. Если напряжение шумов равно полезному сигналу, то минимальная мощность определяется из условия $(U_{\text{ш}}^2)^{1/2} = \beta_0 P_{\text{мин}} = \alpha P_{\text{мин}} / 4\pi \kappa_0 r_k$ (9), где $\beta_0 = \alpha / 4\pi \kappa_0 r_k$ — чувствительность прибора; α — дифференциальная термо-ЭДС BiSb; κ_0 — удельная теплопроводность BiSb. Таким образом,

$$P_{\text{мин}} = \overline{(u_{\text{ш}}^2)^{1/2}} / \beta_0 \quad (10); \quad L = 10 \lg \left[\left(\frac{\Delta \varepsilon}{q} \right)^2 \frac{\alpha}{4\pi f \rho (kT_0 \rho \Delta x_0 / 2\pi r_k)^{1/2}} \right]. \quad (11)$$

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.

Из анализа результатов исследования ВАХ точечных контактов металл — полуметалл (сплавы висмут — сурьма) следует, что два устойчивых и воспроизводимых при комнатной температуре участка ОДС на ВАХ имеют природу электрического пробоя, по видимому, в результате ускорения носителей заряда на длине свободного пробега. Динамический диапазон по мощности определяется электрофизическими свойствами полуметалла висмут — сурьма и конструктивными особенностями индикатора СВЧ-излучения.

Список литературы: 1. *Gayley R. L.* Non-ohmic behavior in stationary bismuth contacts // *J. Appl. Phys.*— 1970.— 41, N 13.— P. 5348—5350. 2. *Межзонный* пробой и пинч-эффект в сплавах висмут — сурьма / И. Б. Брандт, Е. А. Свистова, Е. А. Свистов, Г. Д. Яковлев // *Жури. эксперим. и теорет. физики.*— 1971.— 61, № 3.— С. 1078—1082. 3. *Плаксий В. Т., Светличный В. М.* Пробойные явления в точечных контактах металл — полуметалл // *Лит. физ. сб.*— 1974.— XIV, № 4.— С. 686—687. 4. *Rahman A., Mahanta R. C.* Negative resistance of Bi—Bi₂O₃—Bi sandwich structure // *Indian J. Pure and Appl. Phys.*— 1976.— 14, N 12.— P. 144—147. 5. *Высокочастотные* шумы точечного контакта металл — полуметалл / В. Т. Плаксий, А. П. Захаров, В. М. Светличный, В. В. Старостенко // *Изв. вузов. Радиоэлектроника.*— 1972.— 15, № 5.— С. 657—658. 6. *Плаксий В. Т., Светличный В. М.* Электрофизические свойства.— X. : Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980.— 96 с.

Поступила в редколлегию 14.05.85