

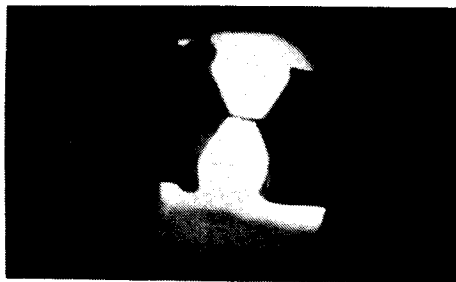
## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ В ВИСМУТЕ**

*Е.Е.Вдовин, А.Ю.Касумов*

Впервые обнаружен электрический пробой в металле (висмуте). На основании экспериментальных результатов сделан вывод о зинеровском механизме пробоя. Высказано предположение о возможности наблюдения этого явления в других металлах.

Явление электрического пробоя состоит в резком увеличении проводимости вещества в достаточно сильном электрическом поле. В металлах это явление, насколько нам известно, никогда не наблюдалось. В настоящей статье сообщается о первом наблюдении электрического пробоя в металле.

Образцы, зажатые в специальные держатели, представляли собой микромостики, изготовленные из сверхчистых монокристаллов висмута, выращенных по Чохральскому. Размеры всего образца составляли  $1 \times 1 \times 15 \text{ мм}^3$ . В области сужения диаметр микромостика достигал величины порядка  $1 \text{ мкм}$  (рис. 1; подобные микромостики из  $\text{Cu}$  и  $\text{W}$  описаны в работе <sup>1</sup>). Длинная ось образцов была направлена вдоль оси  $C_2$ . Измерения электросопротивления проводились при температуре  $1,7 - 5 \text{ К}$  обычным четырехконтактным методом, образцы находились в жидком гелии или его парах. Контакты припаивались к массивным "берегам" микромостика (проверочные эксперименты показали, что расположение контактов практически не влияло на сопротивление образцов).



× 100

Рис. 1. Фотография области сужения образца, снятая длиннофокусным объективом.

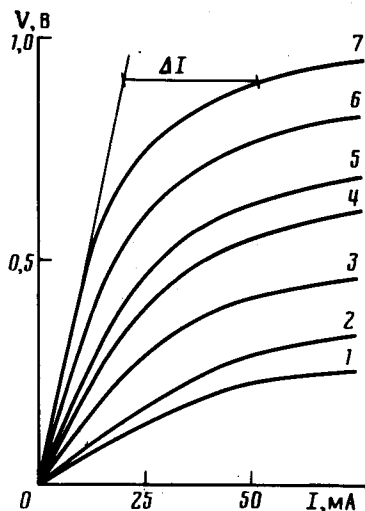


Рис. 2. Влияние продольного магнитного поля на вольт-амперные характеристики микромостика:  $H = 0$  (1),  $4,5 \text{ кЭ}$  (2),  $10,6 \text{ кЭ}$  (3),  $14,6 \text{ кЭ}$  (4),  $17,1 \text{ кЭ}$  (5),  $23,1 \text{ кЭ}$  (6),  $31 \text{ кЭ}$  (7)

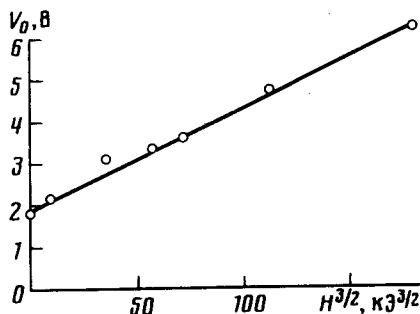


Рис. 3. Зависимость  $V_0$  от продольного магнитного поля

Было измерено около 20 образцов. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов практически не зависели от температуры и имели одну и ту же особенность: при напряжении на мостике  $V \approx 0,1 \text{ В}$  они начинали отклоняться от линейного, омического поведения (рис. 2). Ток через мостик возрастал с повышением напряжения быстрее, чем по линейному закону. Точный анализ ВАХ образцов показал, что нелинейная добавка к току —  $\Delta I$  увеличивается по закону:  $\Delta I \sim \exp(-V_0/V)$ . Величина  $V_0$  возрастает с увеличением диаметра мостика —  $d$  от  $0,5 \text{ В}$  для образца с  $d = 1 \text{ мкм}$  до  $3 \text{ В}$  для образца с  $d = 8 \text{ мкм}$ . В продольном магнитном поле  $V_0$  увеличивалось (рис. 2, 3), причем наклон прямой  $V_0 \sim H^{3/2}$  у разных образцов приблизительно совпадал.

Мы считаем, что экспоненциальный рост  $\Delta I$  вызван экспоненциальным увеличением количества носителей тока. Наиболее вероятной причиной этого может быть ударная ионизация или межзонное туннелирование. Однако в процессе ударной ионизации проводимость  $\sigma$  уве-

личивается по другому закону:  $\sigma \sim \exp \alpha E$  или  $\sigma \sim \exp \alpha \sqrt{E}$  ( $\alpha$  — постоянный множитель), а сам процесс должен начинаться при напряжении на мостике, соответствующем энергии межзонной щели:  $eV \approx E_g^2$  (в висмуте  $E_g \approx 10$  мэВ<sup>3</sup>).

В эксперименте проводимость начинает увеличиваться при гораздо большем напряжении  $eV \gtrsim E_f$  ( $E_f \approx 30$  мэВ — энергия Ферми электронов в висмуте<sup>3</sup>). В этом случае состояния на дне зоны проводимости частично опустошены и туда могут туннелировать носители с края валентной зоны. Эффективная масса носителей заряда в экстремуме зоны есть  $m^* \approx (3-6) \cdot 10^{-3} m_0$  ( $m_0$  — масса свободного электрона)<sup>4,5</sup>, и вероятность туннелирования, вычисленная по формуле Зинера<sup>2</sup>, будет заметной величиной:

$$P = \exp(-\pi m^{*1/2} E_g^{3/2} / 2^{3/2} \hbar F) \sim 0,1,$$

где  $\hbar$  — постоянная Планка;  $F = eV/r_0$  — эффективное электрическое поле в эВ/см.

Плотность туннельного тока  $j_t$ , оцененная по формуле Кейна<sup>6</sup>, может достигать по порядку величины плотности тока основных носителей:

$$J j_t = \frac{e^2 m^* E_g}{72 \lambda \hbar^3} \quad VP \sim 10^6 \text{ А/см}^2 \quad (\lambda \approx 1).$$

Зинеровский механизм пробоя качественно подтверждается также и измерениями в магнитном поле. Включение магнитного поля обычно приводит к увеличению щели на  $\hbar \omega_c$  ( $\omega_c$  — циклотронная частота). В висмуте, однако, этого не происходит, то есть расстояние между ближайшими уровнями с полем практически не меняется<sup>7</sup>. Но с другой стороны переходы между этими уровнями запрещены правилами отбора, а расстояние между ближайшими уровнями с разрешенными переходами, которое и играет роль щели, увеличивается линейно с полем (в сильных магнитных полях  $\hbar \omega_c \gg E_g$  зависимость перестает быть линейной<sup>3</sup>).

Мы можем объяснить экспериментально наблюдаемую зависимость  $V_0 \sim H^{3/2}$  только тем, что из формулы Зинера  $V_0 \sim E_g^{3/2}$ , а  $E_g \sim H$ . Из наклона прямой  $V_0 \sim H^{3/2}$  в таком случае следует, что циклотронная масса электрона в экстремуме зоны составляет, приблизительно,  $10^{-2} m_0$ . (Это коррелирует с прежними оценками<sup>5</sup>).

К сожалению, невозможно провести точного количественного сравнения экспериментальных значений  $V_0$  и теоретических, следующих из формулы Зинера:

$$V_0 = \frac{\pi m^{*1/2} E_g^{3/2} r_0}{2^{3/2} \hbar e}.$$

В основном, из-за неопределенности параметра  $r_0$  — эффективной длины, на которой происходит падение напряжения. При баллистическом режиме пролета электронов электрическое поле сосредоточено в наиболее узкой части мостика —  $r_0 \approx d$ , а  $V_0 \approx 0,07 - 0,6$  В; при диффузионном режиме —  $r_0 = L$  — длине мостика (50 — 70 мкм для разных образцов), а  $V_0 \approx 3,5 - 5$  В.

Для того, чтобы добиться заведомо диффузионного режима, мы специально вводили дефекты в мостик с помощью деформации или резкого охлаждения образцов. Однако при этом качественно изменялись ВАХ: с увеличением электрического поля проводимость образцов не росла, а уменьшалась.

Экспериментальная ситуация, по-видимому, более соответствует баллистическому режиму и отсутствию значительных структурных повреждений в мостиках, (мы не наблюдали ряд аномалий: сверхпроводимости, отрицательной температурной зависимости, слабого влия-

ния на сопротивление магнитного поля, которые обычно наблюдались в сильно поврежденных висмутовых микроэлементах<sup>8</sup>). При баллистическом режиме  $V_0$  не должно зависеть от  $L$  и должно возрастать с увеличением  $d$ , что и наблюдается в эксперименте.

Можно предположить, что обнаруженное в висмуте явление электрического пробоя может иметь место и в других металлах, с малыми межзонными щелями и легкими носителями заряда, таких как Zn, Mg, Be.

В заключение авторы хотели бы поблагодарить Жилиева И.Н. за представленные монокристаллы Bi и полезные советы; Глазмана Л.И., Левинсона И.Б., Хаецкого А.В., Эдельмана В.С. за подробное обсуждение результатов; Копецкого Ч.В. за постоянное внимание к работе.

#### Литература

1. Вдовин Е.Е., Кабулов А.Ю., Копецкий Ч.В., Левинсон И.Б. ЖЭТФ, 1987, 92, 1026.
2. Туннельные явления в твердых телах. Под ред. Э.Бурштейна, С.Лундквиста. М.: Мир, 1973, 81.
3. Эдельман В.С. Электроны проводимости. Под ред. М.И.Каганова, В.С.Эдельмана. М.: Наука, 1985, 229.
4. Эдельман В.С. ЖЭТФ, 1975, 68, 257.
5. Lax B., Mavroidis J.G. Advances in Solid State Physics, Ed. F. Seitz and Turnbull N.Y. Academic Press, 1960, 11, 261.
6. Esaki L. J. Appl. Phys., 1962, 33, 2106.
7. Vecchi M.P., Dresselhaus M.S. Phys. Rev., 1974, B9, 3257.
8. Броневой И.Л., Шарвин Ю.В. Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, 127.

Институт проблем технологии микроэлектроники и  
особочистых материалов  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
2 июля 1987 г.  
После переработки  
13 октября 1987 г.