

## СКАЧКИ РАДИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ВИСМУТЕ

Г. И. Левцев, Э. Г. Ящин

При изучении процессов установления РЭЭ в висмуте ( $4,2^{\circ}\text{K}$ ) на осциллограмме обнаружен скачок, возникающий в присутствии постоянного магнитного поля, при достижении порогового значения СВЧ мощности.

В настоящее время большое внимание уделяется теоретическому исследованию [1 – 4] вклада различных механизмов нелинейности в радиоэлектрический эффект<sup>1)</sup> (РЭЭ). Мы предприняли попытку исследовать процессы установления РЭЭ в монокристалле  $\text{Bi}$  при  $4,2^{\circ}\text{K}$  и в присутствии постоянного магнитного поля ( $H_0$ ). В отличие от опытов, проводимых в стационарном режиме [5, 6], у нас использовалась импульсная ( $\tau_{\text{и}} = 2 - 10 \text{ мксек}$ ) методика. Это позволило существенно увеличить мощность  $P$  (в импульсе), избежав среднего разогрева.

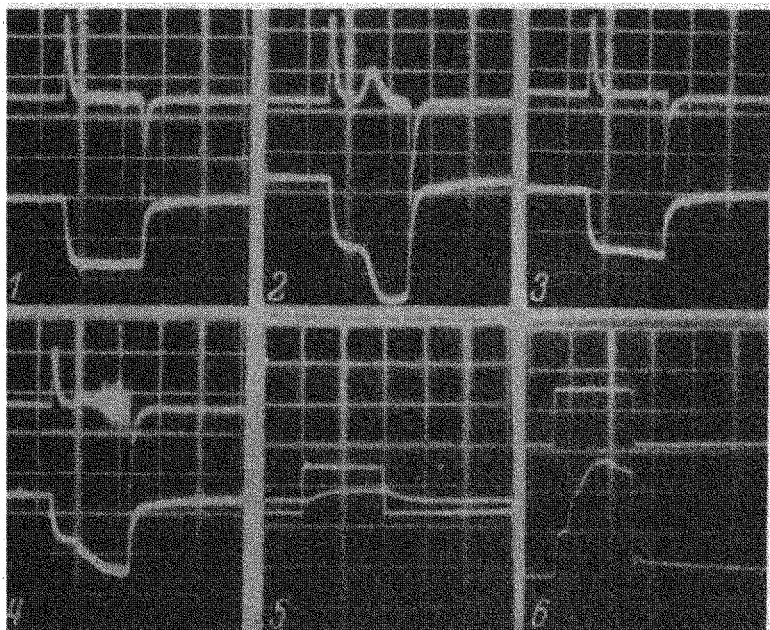


Рис. 1. Осциллограммы РЭЭ при различных величинах  $H_0$ . Малое деление на оси абсцисс –  $0,5 \text{ мксек}$

Образец в форме диска ( $\phi = 1,8 \text{ см}$ , толщина  $d = 0,2 \text{ см}$ ) выращивался в разборной форме [6] из исходного материала  $\text{Bi-0000}$ . Образец служил торцевой стенкой медного прямоугольного резонатора  $\text{TE}_{101}$ , согласованного с волноводом при  $H_0 = 0$ . Наибольшее значение пере-

<sup>1)</sup> РЭЭ – возникновение в металле постоянной ЭДС (или тока), пропорциональной СВЧ мощности.

менного поля  $H$  на образце достигало  $50 \text{ э}$ , что при добротности  $Q = 2000$  требовало мощности порядка  $3 \text{ кВт}$ . Сигнал РЭЭ снимался с катушки и с контактов. Катушка (20 витков, размеры  $\sim 1 \text{ см}$ ) помещалась вблизи образца вне резонатора, контакты прижимались по образующей диска (образец 1) или приваривались на внешней стороне  $V_i$  (образец 2). Величина РЭЭ напряжения на сварных контактах достигала нескольких вольт, а на катушке десятков  $\text{мВ}$ . На рис. 1 (кадры 1–6) приведены типичные осциллограммы. Сигнал РЭЭ изображен на всех кадрах внизу, верхняя кривая на кадрах 1–4 сигнал производного РЭЭ, снимаемый с катушки, а на кадрах 5,6–импульс СВЧ генератора (с детектора). Осциллограммы 1–4 относятся к образцу 1 со следующей ориентацией:  $C_3$  идет почти ( $7^\circ$ ) по нормали к поверхности,  $C_2 \parallel E$ , вдоль измеряемого РЭЭ. ( $E$  – касательная к образцу компонента СВЧ поля). Образец 2 ориентирован косо.

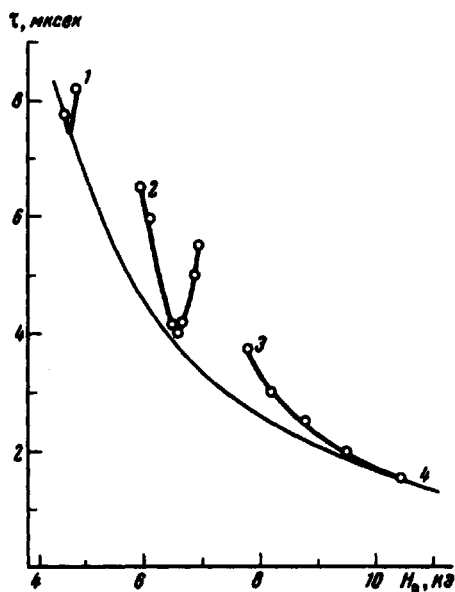


Рис. 2. Зависимость  $\tau(H_0)$  при  $\phi = \pi/2$  (образец 1) 1, 2, 3 – три области существования скачка, 4 – зависимость  $H_0^{-2}$

Кадр 1 сделан при относительно малом магнитном поле ( $H_0 \sim 4 \text{ кэ}$ ). Сигнал РЭЭ почти повторяет форму импульса СВЧ. Однако, видна некоторая "затяжка" РЭЭ, это хорошо видно на кадрах 5 ( $H_0 \sim 50 \text{ э}$ ) и 6 ( $H_0 \sim 6 \text{ кэ}$ ). С ростом  $H_0$  сигнал существенно искажается (кадр 2). Появляется скачок, начало которого на несколько ( $\tau$ )  $\text{мксек}$  отстает от начала импульса РЭЭ. Зависимость  $\tau(H_0)$  не монотонна. На рис. 2 цифрами 1, 2 (см. кадр 2), 3 (см. кадр 4) помечены три области резко выраженного скачка. Между областями скачок существенно падает по амплитуде и измерять  $\tau$  – трудно (см. кадр 3). Огибающая скачка – не гладкая, это хорошо видно в области 3 (кадр 4) по сигналу производной (за пиком, соответствующим скачку следует вспышка шума). Имеется особенность и на спаде РЭЭ при наличии скачка. Спад скачка происходит на много резче спада РЭЭ (см. сигнал производной на кадре 3). Кроме того, в образце 2 наблюдается немонотонность спада РЭЭ (кадр 6).

РЗЭ зависит от угла поворота поля  $H_0$  в плоскости образца. Эта зависимость для образца 1 грубо повторяет  $\sin \phi$  ( $\phi$  угол между  $H_0$  и  $E$ ). В районе максимума РЗЭ скачки существуют в довольно широкой области по  $\phi$  ( $\sim 30^\circ$ ). Есть еще очень узкие ( $5 + 10^\circ$ ) области, симметрично расположенные ( $\pm \pi/3$ ) от  $\phi = \pi/2$ . Однако, в них отсутствует область 1 ( $H_0 \sim 4,5 \text{ кэ}$ ). Все три значения  $\phi$  ( $\pi/2, \pi/2 \pm \pi/3$ ) приходятся на максимумы РЗЭ при температуре  $78^\circ\text{К}$  (нули РЗЭ находятся там же, где и при  $4,2^\circ\text{К}$ ). Возможно, при  $T = 4,2^\circ\text{К}$  в условиях существования слабозатухающих магнитоплазменных волн (МПВ) РЗЭ связан с дырками, ферми-поверхность которых изотропна по  $\phi$ : дело в том, что проводимость и скорость  $v_A$  МПВ (ориентация образца 1) в основном определяются дырками [7]. При  $78^\circ\text{К}$ , когда МПВ не распространяются, РЗЭ, по-видимому, имеет и электронную компоненту, что, и проявляется в наличии трех максимумов РЗЭ при повороте  $H_0$ . То обстоятельство, что скачки РЗЭ как-то связаны с электронами, находится в соответствии со следующим. Расстояние между минимумами на кривой  $\tau(H_0)$  (рис. 2)  $\Delta(H_0^{-1}) = 6 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$  близко к соответствующему значению периода квантовых осцилляций ( $7,8 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$ ) [7] для легких электронов. Однако, остается непонятным очень быстрое изменение  $\Delta(H_0^{-1})$  от  $7 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$  до  $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$  происходящее при повороте  $H_0$  на угол  $5 + 10^\circ$ .

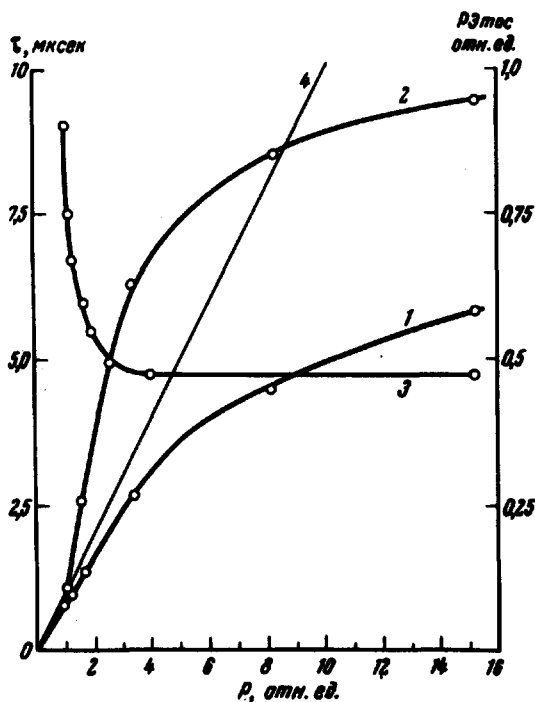


Рис. 3. Зависимость  $\tau$  и РЗЭ (образец 1) от мощности при  $\phi = \pi/2$ ,  $H_0 = 6590 \text{ э}$ . Кривая 1. — РЗЭ, 2 — РЗЭ на скачке, 3. — время  $\tau$ , 4. — линейный закон "РЗЭ-мощность", установленный на малой мощности ( $P < 20 \text{ см}$ ) — соответствующие точки не поставлены

Была исследована зависимость РЗЭ и скачка от СВЧ мощности в области 2 — рис. 3. Величина РЗЭ изучалась перед скачком ( $t = 5 \text{ мксек}$ ), а значение РЗЭ на скачке — в конце импульса ( $t = 10 \text{ мксек}$ ). При мощности  $200 \text{ см}$  ( $H \sim 13 \text{ э}$ ) происходит резкий излом характеристики "ток-мощность". По-видимому, излом происходит еще круче, так как  $\tau$  также зависит от мощности (кривая 3, рис. 3) и недалеко от порога

на кривой 2 отмечены не стационарные значения скачка. При мощностях, превышающих  $P$  в 3 – 4 раза  $P_{99}$  насыщаются. Возможно это связано с разогревом носителей (или решетки) во время СВЧ импульса. Об этом говорит увеличение затухания МПВ при  $P \sim P_{\text{пор}}$  по сравнению с затуханием при  $P \sim 0,85P_{\text{пор}}$ , но при той же средней мощности. Разогрев происходит за времена, меньшие чем 2  $\mu\text{сек}$ , так как характеристика "Р99-мощность" при  $\tau_{\text{и}} = 2 \mu\text{сек}$  (при том же  $H_0$ ) имеет тот же вид, что и кривая 1 (рис. 3). Более того, эта характеристика не меняется и при  $\tau_{\text{и}} = 10 \mu\text{сек}$ , но в поле  $H_0$ , недостаточном для развития скачка. Разогрев решетки, как показывает простая оценка, при  $P = P_{\text{пор}}$  и при  $\tau_{\text{и}} = 5 \mu\text{сек}$ , порядка  $0,5^\circ\text{К}$ .

В заключение укажем на некоторую аналогию вышеизложенного с работой [8], посвященной процессу установления черенковского излучения звука [9] дрейфом носителей в  $\text{Bi}$  в скрещенных  $E_0$  и  $H_0$  полях. Легко показать для двухзонной, изотропной модели  $\text{Bi}$ , что сила Лоренца не только приводит к постоянному Р99 вдоль  $E$  (см., например, [2]), но и постоянному дрейфу носителей вглубь полуметалла. Этот дрейф в  $\omega_H / \omega$  больше Р99 и для самых легких носителей при  $H \sim 10 \text{ э}$  и  $H_0 \sim 6 \text{ кэ}$  достигается пороговое значение скорости дрейфа (скорость звука). В работе [8] наблюдались излом вольт-амперной характеристики, квадратичная зависимость  $\tau(H_0)$ . Однако, у нас в отличие от [8], имеется насыщение Р99 и немонотонная зависимость  $\tau(H_0)$ , хотя минимумы  $\tau$  неплохо укладываются на  $H_0^{-2}$  (кривая 4, рис. 2). Кроме того, мы исследовали изменение  $\tau(H_0)$  при уменьшении  $d$  вдвое (травлением). Время практически не изменялось. В работе [8]  $\tau$  несколько увеличивается с уменьшением  $d$ .

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
12 июля 1973 г.

### Литература

- [1] Л.Э. Гуревич, А.Я. Винников. ФТТ, 15, 87, 1973.
- [2] М.И. Каганов, В.П. Пешков. ЖЭТФ, 63, 2288, 1972.
- [3] Ш.М. Коган. ЖЭТФ, 64, 1071, 1973.
- [4] Я.М. Пинский. ФТТ, 15, 1450, 1973.
- [5] S.J. Buchsbaum, G.E. Smith. Phys. Rev. Lett., 9, 342, 1962.
- [6] М.С. Хайкин, С.Ф. Семенчинский. Письма в ЖЭТФ, 15, 81, 1972.
- [7] Л.А. Фальковский. УФН, 94, 1, 1968.
- [8] T. Umada. J. Phys. Soc. Japan, 20, 1647, 1965.
- [9] L. Esaki. Phys. Rev. Lett., 8, 4, 1962.