

ЧЕТНЫЙ ПО ПОЛЮ ТОК В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКЕ SbSI

*А.А.Греков, В.В.Казакова, А.И.Родин,
Е.В.Стыценко, В.М.Фридкин, С.П.Червонобродов*

Впервые обнаружен четный по полю ток в сегнетоэлектрике. Показано, что возможным механизмом, ответственным за четный по полю ток, является баллистический механизм, заключающийся в рассеянии носителей на заряженных центрах, образующих инжектированный объемный заряд.

Еще Казлаускас и Левинсон предвидели возможность существования четного по полю тока в кристалле без центра симметрии ¹

$$j_k = \alpha_{ijk} E_i E_j \quad (1)$$

Первое экспериментальное наблюдение четного по полю тока было выполнено Ткаченко и Ивановым в пьезоэлектрике *p*-InSb ². Ивченко и Пикус ³ и рассчитали для *p*-InSb четный по полю ток (1) в предположении стриминга и сдвигового механизма.

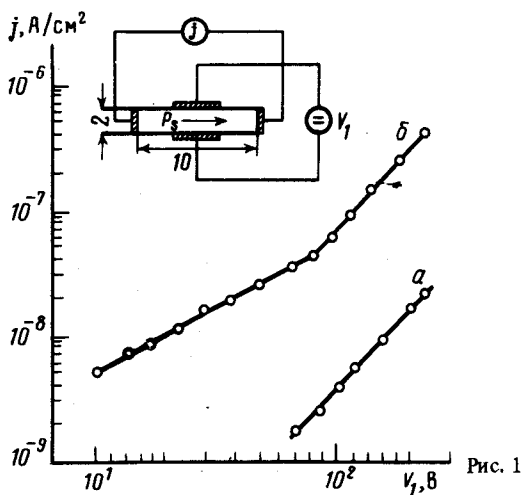


Рис. 1

Рис. 1. Вольт-амперные характеристики поперечного j_3 (а) и продольного j_1 (б) токов. $T = 300$ К. Образец изготовлен в виде параллелепипеда, длиной 10 мм [001], высотой 2 мм [100] шириной 5 мм [010]. Продольный электрод 4×5 мм²

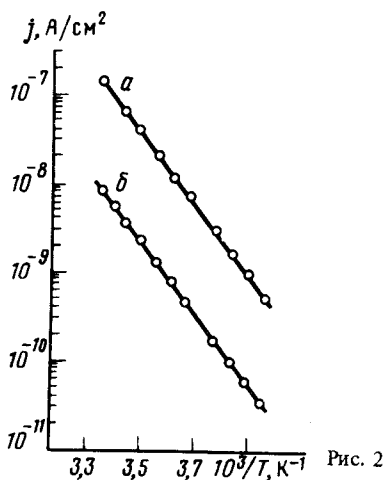


Рис. 2

Рис. 2. Температурные зависимости поперечного j_3 (а), продольного j_1 (б) токов, $E_1 = 1200$ В/см.

В настоящей работе четный по полю ток был впервые экспериментально обнаружен в сегнетоэлектрике вблизи фазового перехода. Сегнетоэлектрик SbSI относится к точечной группе $mm2(C_{2v})$, что позволяет согласно (1) представить четный по полю ток в форме

$$j_3 = \alpha_{31} E_1^2 \quad (2)$$

Здесь E_1 — внешнее поле, приложенное в направлении [100], j_3 — квадратичный по полю ток, текущий в направлении спонтанной поляризации. Исследовались модифицированные кристаллы SbSI, выращенные методом Бриджмена, и имевшие $T_c = +60^\circ\text{C}$ ⁴⁻⁵. На грани (100) наносились электроды из аквадага, к которым прикладывалось продольное поле E_1 ($E_1 = 50 \div 1200$ В/см). Поперечный ток j_3 измерялся с помощью аквадаговых электродов, нанесенных на грани, перпендикулярные [001]. Экспериментальные результаты сводятся к следующему. В продольном направлении [100] течет ток, ограниченный объемным зарядом $j_1 \approx V_1^2/L^3$ (V_1 — приложенное в продольном направлении напряжение, L — расстояние между электродами в продольном направлении). В поперечном направлении измеряется ток j_3 , причем, в согласии с (1), $j_3 \sim V_1^2$. Эффект наблюдается в сегнетофазе, при переходе в centrosymmetric парафазу поперечный ток j_3 исчезает. При 180-градусной переполяризации сегнетоэлектрика поперечный ток j_3 меняет свое направление. В полидоменном кристалле четный по полю ток j_3 отсутствует. Таким образом, направление четного по полю тока j_3 зависит от направления спонтанной поляризации. Сравнение экспериментальных результатов с (1) дало $\alpha_{31} \approx 10^{-14} \div 10^{-15}$ А·В⁻². Компонента α_{31} оказалась на несколько порядков ниже соответствующей компоненты фотовольтаического тензора α_{31}^Φ в SbSI ⁵. В режиме разомкнутой поперечной цепи наблюдалось квадратичное по полю напряжение ~ 20 В, что на порядок больше ширины запрещенной зоны кристалла. Показано, что квадратичное по полю напряжение ограничено только электропроводностью кристалла. Квадратичный по полю

поперечный ток j_3 наблюдался лишь тогда, когда в продольном направлении [100] протекал ток j_1 , ограниченный объемным зарядом. При линеаризации вольт-амперной характеристики j_1 поперечный ток j_3 исчезал.

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики $j_1(V_1)$ и $j_3(V_1)$. В поле $E_1 = 400 \div 1200$ В/см отношение j_3/j_1 достигает 6%. На рис. 2 представлены температурные зависимости j_1 и j_3 , из которых видно, что $j_1, j_3 \sim \exp(-U/kT)$, где энергия активации $U \approx 0,8$ эВ. Таким образом, температурная зависимость четного по полю тока в SbSI обратна температурной зависимости, полученной в ³ для стриминга. Подсветка красным светом с энергией 0,8 эВ приводит к росту j_1 и j_3 . При подсветке в собственной области j_1 вследствие фотопроводимости растет, вольт-амперная характеристика фототока линеаризуется, а поперечный ток j_3 исчезает.

Температурная зависимость j_1 и j_3 , а также связь четного по полю тока j_3 с инжекцией носителей в направлении [100] можно объяснить, исходя из того, что продольный ток j_1 ограничен объемным зарядом, а поперечный ток j_3 связан с асимметричным рассеянием электронов на заряженных ловушках, образующих объемный заряд. Пусть объемный заряд, образующийся путем инжекции электронов в продольном направлении (ток j_1), состоит из свободных электронов с концентрацией n и захваченных ловушками электронов с концентрацией N и энергией активации U . При слабом заполнении ловушек связь между n и N дается

$$n = k_2^T N / \beta M, \quad (3)$$

где M — концентрация ловушек, β — их сечение захвата, $k_2^T = \beta N_c \exp(-U/kT)$, N_c — плотность состояний, $n \ll N$. Уравнения и граничные условия для продольного тока j_1 , ограниченного объемным зарядом Nq , даются (4) — (5):

$$j_1 = q\mu n E_1; \quad \frac{dE_1}{dx} = \frac{4\pi}{\epsilon} Nq; \quad \frac{dj_1}{dx} = 0 \quad (4)$$

$$E(x=0) = 0; \quad E(x=L) = E_1^0; \quad E_1^0 = \frac{V_1}{L}. \quad (5)$$

Решение (4) — (5) дает известную вольт-амперную характеристику j_1 :

$$j_1 = \frac{\mu k_2^T \epsilon}{8\pi\beta M} \frac{V_1^2}{L^3}. \quad (6)$$

Если ток j_3 обусловлен асимметричным рассеянием электронов на заряженных ловушках, то

$$j_3 \sim j_1 \langle l \rangle P_0, \quad (7)$$

где P_0 — спонтанная поляризация, $\langle l \rangle$ — средний сдвиг электрона в поперечном направлении. Из (6) и (7) непосредственно видны температурная зависимость j_1 и j_3 и влияние красной подсветки.

Авторы благодарны Г.Е.Пикусу и Е.Л.Ивченко за обсуждение.

Литература

1. Казлаускас П.-А.В., Левинсон И.Б. ФТТ, 1964, 6, 3192.
2. Ткаченко А.Ю., Иванов Ю.Л. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 270.
3. Ивченко Е.Л., Пикус Г.Е. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 268.
4. Беляев Л.М., Греков А.А., Сыркин Л.Н., Татаренко Л.Н., Проценко Н.П. Акустический журнал, 1977, 23, 810.
5. Герзанич Е.И., Фридкин В.М. Сегнетоэлектрики типа $A^V B^VI C^VII$, М.: Наука, 1982.