[4] Егоров В. С., Федоров А. Н. // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. № 5. С. 1647—1657.
[5] Брандт Н. Б., Егоров В. С., Лавренюк М. Ю., Минина Н. Я., Савин А. М. // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. № 4. С. 1157—1169.
[6] Самойлович А. Г., Клингер М. И. // ФТТ. 1959. Т. 1. Сб. II. С. 143—157.
[7] Заварицкий Н. В., Квон З. Д. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. № 2. С. 61—63.
[8] Заварицкий Н. В., Суслов И. М. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. № 6. С. 2152—2165.
[9] Абрикосов А. А., Панцулая А. В. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 7. С. 2140—2144.

Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова
Москва

Поступило в Редакцию
16 июня 1989 г.

УДК 621.315.592

© Физика твердого тела, том 32, № 3, 1990
Solid State Physics, vol. 32, N 3, 1990

ПРЫЖКОВЫЙ АКУСТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Г. М. Шмелев, И. С. Чебан, В. Д. Фуркулица

В данной заметке речь идет об акустическом аналоге фотогальванического (ФГ) тока [1] — акустогальваническом (АГ) токе [2, 3], возникающем в нецентросимметричных кристаллах под действием звуковой волны. В отличие от «обычного» акустоэлектрического АГ ток четен по волновому вектору звука $\mathbf{q}$, т. е. величина АГ тока не меняется при замене $\mathbf{q} \to -\mathbf{q}$.

Ранее АГ эффект теоретически исследовался в моделях, в которых ток создается зонными носителями [2-4]. Рассмотрение этого эффекта для прыжкового механизма переноса электронов между примесными центрами интересно по ряду причин: 1) ФГ эффект — прототип АГ эффекта — при прыжковом механизме электропереноса существует, и он может оказаться вполне наблюдаемым [5], причем 2) как и ФГ, АГ ток должен иметь относительно большую величину в материалах с малой подвижностью (например, в сегнетоэлектриках $LiNbO_3$, $BaTiO_3$) [2, 3]; 3) при низких температурах, когда число находящихся выше порога подвижности электронов экспоненциально мало, обычный акустоэлектрический ток равен нулю (это обусловлено тем, что импульс звуковой волны передается вмороженным в решетку примесным центрам, на которых локализованы электронные состояния).

Здесь мы рассматриваем аналогичную [5] ситуацию (концентрация примесей не слишком велика $N_d \lesssim 4 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$; низкие температуры), в которой стимулированный звуковым потоком (в [5] — светом) перескок электрона между двумя дефектами осуществляется в два этапа через виртуальные состояния электрона в зоне проводимости (неконтактный перескок [5, 6]). Каждый этап сопровождается излучением (поглощением) фонона. При этом один из фононов ($\mathbf{q}_1$) внешний, а другой, акустический ($\mathbf{q}_2$), тепловой. Перескок происходит между центросимметричным основным состоянием одного примесного центра и нецентросимметричным возбужденным состоянием другого. Вероятности переходов в направлении униполярной оси (условно — вправо) и в противоположном направлении (влево) различны, что и приводит к возникновению АГ тока.

Звуковую волну мы рассматриваем как поток когерентных фононов с δ-образной функцией распределения в пространстве волновых векторов $\mathbf{q}_1$

$$N_{q_1} = \frac{(2\pi)^3}{\hbar \omega_{q_1} s} \Phi \delta (q_1 - q_0), \qquad (1)$$

где Φ — величина плотности потока звуковой энергии; ω_{q_1}, s — частота и групповая скорость звука. Взаимодействие электронов с фононами деформационное. При расчете вероятностей перехода мы следуем общим формулам работ [5, 6], в которых заменяем планковскую функцию распределения N_{q_1} на функцию (1) и полагаем $N_{q_2}=0$, исключая тем самым (для простоты) возможность процессов, связанных с поглощением теплового фонона. Кроме того, считаем одинаковой глубину залегания всех примесных центров. Как и в [5], волновая функция электрона на дефекте выбирается в виде гауссовской

$$\Psi_{ij}(\mathbf{r}) = (2/\pi\gamma_i)^{3/4} \exp\{-|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i - \mathbf{u}\delta_{j2}|^2/\gamma_i^2\}, \tag{2}$$

где $i=1, 2$ нумерует дефекты, а $j=1, 2$ состояния; $\mathbf{u}$ — смещение центра волновой функции в возбужденном ($j=2$) состоянии. Соответствующие (2) собственные значения энергии обозначаем через E_j. Виртуальные состояния электрона в зоне проводимости описываем плоскими волнами.

Приведем результаты расчета в оптимальных для наблюдения эффекта условиях: $\varkappa_0=q_0\gamma_1 \ll 1$, $\Delta=(E_2-E_1)\varkappa_0/(\hbar\omega_{q_0}) \ll 1$, $r_0^{-2}=2m^*(E_g-E_1)\gamma_1^2/\hbar^2 \ll 1$ (E_g — ширина запрещенной зоны). Вероятности переходов «вправо» $P(|\rho+\mathbf{u}_0|)$ и «влево» $P(|\rho-\mathbf{u}_0|)$ ($\rho=\mathbf{R}/\gamma_1$; $\mathbf{u}_0=\mathbf{u}/\gamma_1$) в этих условиях равны

$$P(|\rho \pm \mathbf{u}_0|) = C(\varkappa_0)\frac{\exp(-2r_0^{-1}|\rho \pm \mathbf{u}_0|)}{|\rho \pm \mathbf{u}_0|^2}[1+\cos(\varkappa_0, \rho \pm \mathbf{u}_0)], \tag{3}$$

$$C(\varkappa_0) = \frac{m^{*2}\alpha^{3/2}\gamma_1\sigma^4\Phi}{s^5\hbar^5 d_0^2}(\varkappa_0-\Delta)^3 \quad (\varkappa_0>\Delta), \tag{4}$$

где $\alpha=(\gamma_2/\gamma_1)^2$, $\varkappa_0=q_0\gamma_1$, m^* — эффективная масса электрона, σ — константа деформационного потенциала, d_0 — плотность кристалла.

Величина АГ тока определяется разностью между вероятностями переходов «вправо» и «влево» [5]. В линейном по u_0 приближении плотность тока имеет вид

$$\mathbf{j} = en_dN_d\gamma_1^4\int d^3\rho\rho w(\rho)\left(\operatorname{grad}P(|\rho+\mathbf{u}_0|)|_{\mathbf{u}_0=0},\ \mathbf{u}_0\right), \tag{5}$$

где n_d — концентрация электронов на дефектах, $w(\rho)=\exp(-4\pi N_d\gamma_1^3\rho^3)$ — вероятность нахождения ближайшего (к выделенному) дефекта на расстоянии ρ. Выполняя интегрирование в (5), находим

$$\mathbf{j} = -G(\varkappa_0)[a_1\mathbf{u}_0 + a_2\varkappa_0^2\mathbf{u}_0 + a_3\varkappa_0(\varkappa_0\mathbf{u}_0)], \tag{6}$$

где

$$G(\varkappa_0) = 4\pi/15\cdot C(\varkappa_0)en_dN_d\gamma_1^4,\quad a_1=5(2+3r_0),\quad a_2=0.5(1+2.5r_0+2.5r_0^2+1.25r_0^3),$$

$$a_3=4a_2-1.$$

Сделаем численные оценки: при $\gamma_1=\gamma_2\simeq10^{-8}$ см, $m^*/m_0\simeq0.1$, $s\simeq5\cdot10^5$ см/с, $\omega_{q_0}\simeq5\cdot10^{12}$ с$^{-1}$, $|E_g-E_1|=8\cdot10^{-13}$ эрг, $|E_1-E_2|\simeq4.5\times10^{-15}$ эрг, $\Phi=0.01$ Вт/см^2, $d_0=5$ г/см^3, $n=4\cdot10^{18}$ см$^{-3}$, $u=5\cdot10^{-8}$ см величина $j\simeq3\cdot10^{-8}$ А/см^2.

Авторы благодарят Ю. М. Гальперина за обсуждение отдельных аспектов работы.

Список литературы

[1] Белиничер В. И., Стурман Б. И. // УФН. 1980. Т. 130. № 3. С. 415—458.
[2] Шмелев Г. М., Нгуен Хонг Шон, Цуркан Г. И. // ФТП. 1984. Т. 18. № 7. С. 1314—1316.
[3] Шмелев Г. М., Нгуен Хонг Шон, Цуркан Г. И. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 11. С. 3499—3502.
[4] Чабан А. А. // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 43. № 2. С. 74—75.
[5] Винецкий В. Л., Годенко Л. П. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 4. С. 1086—1093.
[6] Винецкий В. Л., Годенко Л. П. // ФНТ. 1984. Т. 10. № 1. С. 90—94.

Кишиневский государственный
университет им. В. И. Ленина
Кишинев

Поступило в Редакцию
26 апреля 1989 г.
В окончательной редакции
10 июля 1989 г.