

П. Е. САРЖЕВСКИЙ

## ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КВАРЦА ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 3 XII 1951)

Для многих диэлектриков и полупроводников в условиях сильных электрических полей установлена зависимость электропроводности от напряженности электрического поля. Однако ни механизм явления, ни природа добавочной проводимости диэлектриков в сильных полях до сих пор еще не выяснены. Кроме того, важно знать, одинаковы ли у аморфных и кристаллических тел закономерности увеличения проводимости с полем и связан ли механизм пробоя с механизмом пулевской проводимости.

Настоящая работа посвящена исследованию электропроводности естественного кварца ( $\text{SiO}_2$ ) в сильных электрических полях (<sup>1</sup>). В области слабых электрических полей (до 1 кв/см) кварц подчиняется закону Ома (<sup>2</sup>), однако начиная с поля 2 кв/см наблюдаются отклонения от него (<sup>3</sup>). Предпринимавшиеся ранее попытки исследовать кварц в более сильных полях (<sup>4</sup>) не увенчались успехом, так как авторам не удалось достичь стационарных условий измерений.

Вначале образцы подвергались электрической и термической обработке, заключающейся в длительном пребывании их под напряжением при высокой температуре. При этом имело место необратимое убывание электропроводности со временем под влиянием электролитической очистки и температурного выветчивания. Измерения производились на стационарном темновом остаточном токе.

Зависимость электропроводности кристаллического кварца от напряженности электрического поля была снята в интервале от 5 до 500 кв/см при различных температурах (от 150 до 480°C). Некоторые результаты приведены на рис. 1.

Как показали опыты, закон Ома выполняется лишь в ограниченном интервале полей (до 10 кв/см) при температурах выше 400°C (горизонтальные участки кривых 6 и 7 рис. 1). При более сильных полях и низких температурах имеет место рост проводимости с полем.

Зависимость проводимости кварца от поля лучше всего может быть выражена формулой Френкеля

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta V E} \quad (1)$$

при  $T = \text{const}$ , где постоянные  $\sigma_0$  и  $\beta$  зависят от температуры, кристаллографического направления и индивидуальных качеств образцов. С увеличением температуры  $\sigma_0$  экспоненциально увеличивается, а  $\beta$  уменьшается обратно пропорционально абсолютной температуре до 300°C и значительно быстрее при более высокой температуре. В направлении,

параллельном оптической оси,  $\beta$  больше, чем в перпендикулярном направлении ( $\beta_{\parallel} \sim 0,01$  (см/В)<sup>1/2</sup>,  $\beta_{\perp} \sim 0,001$  (см/В)<sup>1/2</sup>), причем во всех случаях чем больше проводимость образца, тем меньше  $\beta$ .

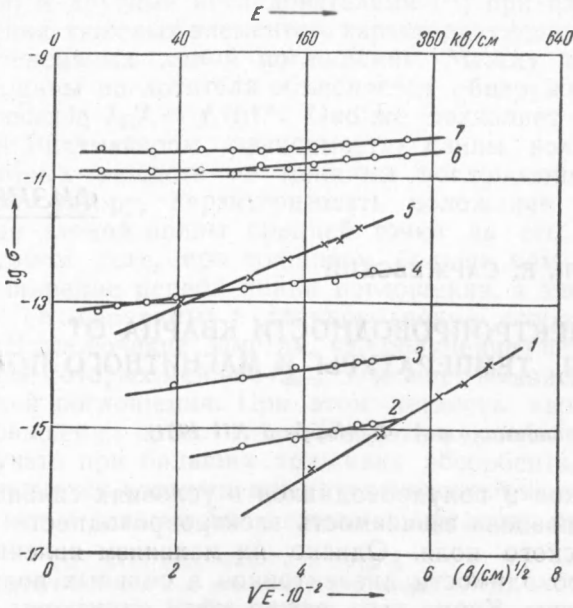


Рис. 1. Зависимость проводимости от электрического поля. 1 — обр. 61 ( $\vec{E} \parallel \vec{Z}$ ), 200°C; 2, 3, 4 — обр. 43 ( $\vec{E} \perp \vec{Z}$ ): 2 — 151°C, 3 — 190°C, 4 — 248°C; 5 — обр. 71 ( $\vec{E} \parallel \vec{Z}$ ), 203°C; 6 и 7 — обр. 26 ( $\vec{E} \perp \vec{Z}$ ): 6 — 457°C, 7 — 479°C

Исследование зависимости электропроводности от температуры было произведено в достаточно широком интервале от 150 до 500°C при различных полях. Данные измерений для одного из образцов приведены на рис. 2. Измерения велись в направлении от низких температур к высоким.

Из рис. 2 следует, что кривая  $\lg \sigma = f(1/T)$  при  $E = \text{const}$  претерпевает излом при температуре около 300°C. Зависимость электропроводности от температуры может быть выражена формулой

$$\sigma = \sigma_1 e^{-B_1/T} + \sigma_2 e^{-B_2/T} \quad (2)$$

при  $E = \text{const}$ , где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $B_1$  и  $B_2$  — постоянные, зависящие от поля и кристаллографического направления. Наклон кривых  $B_1$  в области низких температур ( $t < 300^\circ\text{C}$ ) меньше, чем наклон  $B_2$  в области высоких температур ( $t > 300^\circ\text{C}$ ). Все кривые, различающиеся напряженностью электрического поля в области низких температур, при достаточно высоких температурах стремятся слиться в одну кривую ( $B_2 = 21000^\circ\text{K}$ ). С увеличением поля постоянная  $B_1$  уменьшается согласно соотношению

$$B_1 = B_0 - b\sqrt{E}, \quad (3)$$

где  $B_0$  и  $b = \beta T$  — постоянные. В зависимости от кристаллографического направления  $B_0$  принимает значения:

$$B_{0\parallel} \cong 12000^\circ\text{K}, \quad B_{0\perp} \cong 14000^\circ\text{K}$$

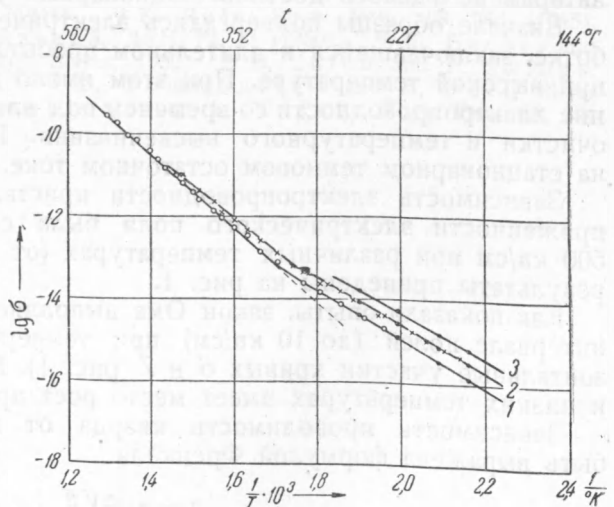


Рис. 2. Зависимость проводимости от температуры, обр. 27 ( $\vec{E} \perp \vec{Z}$ ). 1 — 28 кВ/см, 2 — 110 кВ/см, 3 — 220 кВ/см

Наличие излома температурной кривой электропроводности в сильных полях, наряду с эффектом Пуля, могло свидетельствовать о том, что проводимость кварца в этих условиях имеет различный характер в области низких и высоких температур. Для выяснения этого вопроса были поставлены опыты по измерению гальваномагнитных эффектов в кварце.

Обнаружение гальваномагнитных эффектов является прямым и, следовательно, качественно более достоверным доказательством электронной (дырочной) проводимости диэлектрика, поскольку на ионном токе в твердых телах эти эффекты не наблюдаются (из-за малой подвижности ионов). Для измерения эффекта Холла мы применили метод разделенного электрода, подобный методу Лукирского—Тартаковского<sup>(5, 6)</sup>, с той лишь разницей, что измерения производились по методу постоянного отклонения с компенсацией. Этот метод качественный, так как мы измеряем среднее состояние, выровненное металлическими электродами Холла.

Зависимость продольного гальваномагнитного эффекта от напряженности магнитного поля была снята в интервале от 5000 до 15000 эрст. при различной температуре и напряженности электрического поля (см. рис. 3). Это приводит к следующему соотношению:

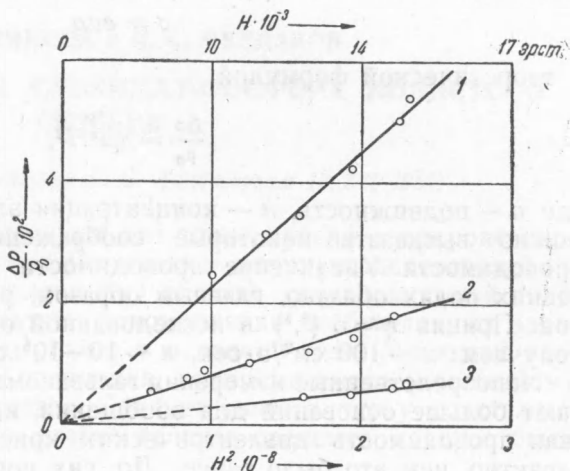


Рис. 3. Зависимость изменения сопротивления от магнитного поля, обр. 44 ( $\vec{E} \perp \vec{Z}$ ). 1 — 169°C, 24 кв/см; 2 — 169°C, 190 кв/см; 3 — 205°C, 190 кв/см

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = cH^2 \quad (4)$$

при  $T = \text{const}$  и  $E = \text{const}$ , где  $c \sim 10^{-11} - 10^{-10}$  эрст.<sup>-2</sup> — постоянная, зависящая от температуры, напряженности электрического поля и кристаллографического направления.

Как показали опыты, с увеличением напряженности электрического поля (при постоянных  $T$  и  $H$ ) продольный эффект вначале не зависит от поля (слабые поля), затем уменьшается примерно до 300 кв/см, а в более сильных полях наблюдается некоторый рост его. Убытие  $\Delta \rho / \rho_0$  с  $E$  происходит примерно обратно пропорционально  $E$ . Необходимо заметить, что рост продольного эффекта с полем почти всегда совпадал с появлением значительных флуктуаций тока и более подробно исследован быть не мог. Примерно в этой же области обнаруживался и эффект Холла. С увеличением температуры (при постоянных  $E$  и  $H$ ) продольный эффект уменьшался и около 300°C уже не обнаруживался (составлял меньше 0,0001). Заметим, что при прочих равных условиях величина продольного эффекта больше в направлении, параллельном оптической оси, и у образцов с меньшей электропроводностью.

Таким образом, гальваномагнитные эффекты в кварце были обнаружены в области пулевской проводимости, ниже точки излома температурной кривой электропроводности. Наличие гальваномагнитных

эффектов у кварца является весьма важным опытным фактом, свидетельствующим о том, что низкотемпературная проводимость кварца в сильных электрических полях имеет электронный характер (по знаку эффекта Холла). Этот вывод находит подтверждение также и в результатах предварительных опытов по измерению чисел переноса в кварце (7). Проводимость кварца в области высоких температур, повидимому, имеет ионный характер, о чем свидетельствуют: наличие явления электролитической очистки, отсутствие гальваномагнитных эффектов и наличие некоторого омического участка электропроводности.

Воспользовавшись соотношением

$$\sigma = eun$$

и теоретической формулой

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \eta u^2 H^2, \quad (6)$$

где  $u$  — подвижность,  $n$  — концентрация электронов и  $\eta$  — постоянная, можно высказать некоторые соображения о механизме пулевской проводимости. Увеличение проводимости кварца в сильных электрических полях обязано, главным образом, росту концентрации электронов. Приняв  $\eta = 5$  (8,9) в исследованной области температур и полей, получаем:  $u \sim 100$  см<sup>2</sup>/в.сек,  $n \sim 10-10^5$  см<sup>-3</sup>.

Непосредственные измерения гальваномагнитных эффектов в кварце дают больше оснований для обобщений, касающихся того, что пулевская проводимость диэлектрических кристаллов имеет электронный характер, чем это было ранее. До сих пор были исследованы только слюда (10) и карборунд (9).

В заключение автор считает своим долгом принести благодарность В. И. Пружининой-Грановской за постоянный интерес к работе и ценные советы, чл.-корр. АН СССР В. К. Аркадьеву, проф. Г. И. Скани и проф. Ф. Ф. Волькенштейну за дискуссию результатов.

Поступило  
26 IX 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> П. Е. Саржевский, Диссертация, 1950. <sup>2</sup> А. Ф. Иоффе, Физика кристаллов, 1929. <sup>3</sup> V. E. Whitman, Journ. Opt. Soc. Am., 12, No. 1, 31 (1926). <sup>4</sup> H. Schiller, Ann. d. Phys., 83, 137 (1927). <sup>5</sup> П. Лукирский, ЖРФХО, 50, 26 (1918). <sup>6</sup> П. Тартаковский, Zs. f. Phys., 66, 830 (1930). <sup>7</sup> Ф. Квитнер, Изв. АН СССР, сер. физ., 4, 601 (1936). <sup>8</sup> Б. И. Давыдов, ЖЭТФ, 7, 1069 (1937). <sup>9</sup> В. И. Пружинина-Грановская, ЖТФ, 19, 100 (1949). <sup>10</sup> В. Пружинина-Грановская, ДАН, 21, 371 (1938); ЖЭТФ, 10, 878 (1940).