

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 523.746

**О ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ БАРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА****В. И. Григорьев, В. С. Ростовский***(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)***Предложена идея нового метода экспериментального исследования бароэлектрического эффекта и приведены количественные оценки его реализуемости.**

Перераспределение зарядов в проводнике, порождаемое перепадами давлений, приводит к образованию электрического поля (бароэлектрический эффект). Этот эффект пока не получил прямого и наглядного подтверждения в лабораторном эксперименте.

Фактически первой попыткой постановки такого эксперимента были опыты П. Н. Лебедева в 1911 г. [1] для проверки гипотезы Сазерленда [2] о влиянии гравитационного поля на распределение электронов в проводнике. Поскольку аналогичное влияние может проявляться под действием не только гравитационного, но и центробежного поля, П. Н. Лебедев поставил целью заметить и исследовать «намагничивание вращением»: кольца из различных материалов подвергались быстрому вращению, что, как предполагалось, вызывает перераспределение зарядов в них. Вращение таких перераспределившихся зарядов должно приводить к появлению магнитного поля, которое и пытался заметить П. Н. Лебедев.

Помимо того что работа протекала в трудных условиях, она была не простой и в техническом отношении: кольцам радиуса  $R \approx 1$  см нужно было сообщить угловую скорость до  $10^4$  с<sup>-1</sup>, чтобы ожидавшиеся в соответствии с оценками Сазерленда (как было выяснено позже [3], сильно завышенными) магнитные поля достигли доступных для измерения напряженностей.

Техническая сложность эксперимента проистекала из стремления имитировать гравитационные силы (а именно они представлялись причиной перераспределения зарядов) центробежными.

Прошло не менее полувека, прежде чем было выяснено, что определяющее влияние на перераспределение зарядов оказывают не сами гравитационные силы, а порождаемые ими неоднородности давлений\*) в проводнике [4]. Когда это было понято, открылась возможность таких лабораторных исследований бароэлектрического эффекта, когда эти неоднородности давлений обуславливаются не гравитацией, а другими внешними воздействиями на проводники. Однако ни теоретических, ни экспери-

ментальных работ в этом направлении фактически не было.

Одной из причин стало ошибочное мнение [5], что статические неоднородности давлений не вызывают перераспределения зарядов, а значит и появления «бароэлектрических» полей, в отличие, например, от возникновения термоэлектрических полей при перепадах температур.

Теоретическое рассмотрение процессов формирования бароэлектрических полей проводилось достаточно подробно, например в работе [4], здесь же мы остановимся на некоторых вопросах, касающихся лабораторных экспериментальных методов их исследования. При кажущейся простоте эти методы пока еще не были реализованы.

Действительно, что может быть проще: взять химически однородный брусок, зажать один его конец в тиски и измерить разность потенциалов между этим сжатым и другим, свободным, концом. Это — кажущаяся простота. Для пояснения обратимся к хорошо известному вопросу о контактных разностях потенциалов.

Если привести в соприкосновение два бруска, например цинковый и медный, то благодаря тому, что работа выхода электронов из цинка меньше, чем из меди, в первые мгновения возникнет ток, часть электронов перейдет из цинка в медь и возникнет разность потенциалов между брусками. Однако возникшее «контактное» электрическое поле является «безваттным» (известное правило Вольты: благодаря одному лишь контактному полю поддерживать постоянный ток невозможно).

Пусть в начальный момент ключ разомкнут. После его замыкания часть электронов из цинка устремляется в медь и благодаря диоду, создающему асимметрию в системе, гальванометр должен зарегистрировать кратковременный ток, некоторое количество проходящего через него заряда.

Теперь несколько изменим цепь: будем считать, что оба бруска имеют одинаковый химический состав (например, алюминий), но один из них находится под давлением  $p_1$ , а другой — под давлением  $p_2$ .

Если бруски химически однородны, но один из них сильно сжат, то объемная плотность энергии в

\*) В более общем случае — неоднородности механических напряжений.

нем больше, чем в другом, и в первые мгновения после замыкания цепи электронам энергетически выгодно частично перейти во второй.

Таким образом, прослеживается очевидное сходство бароэлектрической картины с рассмотренной выше контактной.

Отметим, что имеется и отличие от последней: здесь определяющее значение имеет различие не работ выхода, а объемной плотности энергии электронов в брусках.

После замыкания ключа заряд, который должен пройти через гальванометр, обусловлен лишь бароэлектрическим эффектом, если в системе нет химических и температурных неоднородностей\*). При таком варианте эксперимента отпадает часть технических проблем, связанных с быстрым вращением образцов в опытах П. Н. Лебедева, но открывается также возможность некоторых количественных исследований зависимости бароэлектрического перераспределения зарядов от перепадов давлений\*\*). Все сказанное выше касается лишь качественной стороны дела. Необходимо дополнить ее некоторыми количественными оценками.

Для того чтобы изотермически сжать образец единичного объема (изготовленный из изотропного материала) до давления  $p$ , нужно произвести работу  $\delta A \approx \frac{p^2}{2B}$ , где  $B$  — объемный модуль всестороннего сжатия (см., напр., [6]). Почти вся производимая при упругой деформации энергия идет при этом на увеличение энергии электронов, так что энергия каждого из электронов увеличивается на величину  $A \lim \frac{\delta A}{N}$ , где  $N$  — число электронов в образце.

Если  $A$  достигает значения порядка разности работ выхода  $\delta I = I_1 - I_2$  из одного и другого образца (которая близка к разности энергий ионизации), т. е. когда достигается равенство  $\delta I \approx A$ , наступает энергетическая возможность переходов электронов из одного образца в другой.

Таким образом, можно оценить перепад давлений  $\Delta P$ , при котором после замыкания цепи должно заметно увеличиваться перетекание зарядов через гальванометр. Ток быстро затухает, так что целесообразно использовать именно баллистический гальванометр для определения общего заряда, протекающего после замыкания цепи.

Простейшая оценка для  $\Delta P$  такова:

$$\Delta P \approx \sqrt{2\delta I N B}. \quad (1)$$

Для того чтобы получить представление о необходимых давлениях  $\Delta P$ , примем для входящих

\*) Целесообразно замыкать цепь лишь после того, как закончено сжатие одного из брусков и температура во всех ее участках снова выровнилась. Однако следует по возможности проводить измерения достаточно быстро, чтобы ослабить влияние оседающих на брусках заряженных ионов из воздуха. Это замечание отпадает, если поместить образцы в вакуум, что усложняет опыт.

\*\*) Другой упрощенный вариант: цепь не замкнута, нужна в диоде отпадает, ключ, первоначально разомкнутый, располагается между брусками.

в оценку (1) величин следующие численные значения (в абсолютной гауссовой системе единиц):

$$I \approx 10^{-12}; \quad B \approx 10^{12}; \quad N \approx 10^{23}.$$

Конечно, это грубоориентировочная оценка; имеется весьма широкий разброс давлений, при которых должно происходить перетекание зарядов через гальванометр.

Интереснее оценить величину этого перетекающего заряда. Ниже предлагается простейший вариант.

Отличие металлов друг от друга проявляется в первую очередь в размерах атомных ячеек  $b$  и количестве электронов  $Z$  в каждой из них.

По грубой оценке, энергия электронов одной атомной ячейки  $E_1 \approx -\frac{Ze^2}{b}$ .

В химически и физически однородном веществе отношение  $Z/b$  для всех ячеек, как и число этих ячеек в единице объема, одинаково, так что в среднем переходы электронов из ячейки в ячейку энергетически не оправданы и не совершаются. Если же условие постоянства объемной плотности энергии электронов нарушается, происходит перегруппировка электронов, пока это условие не начинает снова выполняться.

Обратимся к более конкретной постановке задачи. Пусть имеются два одинаковых по своему химическому составу и несжатых бруска, для которых отношения  $Z/b$  одинаковы. Если поместить один из них под давление  $p$ , то радиус атомной ячейки в нем изменится:  $b \rightarrow b - \delta b$ . Но изменится также и число электронов в ячейке ( $Z \rightarrow Z - \delta Z$ ) за счет их частичного перехода в ячейки несжатого бруска\*). Привлекая условие постоянства объемной плотности энергии в обеих ячейках

$$\frac{Z(Z - \delta Z)}{b - \delta b} = \frac{Z^2}{b},$$

получаем условие для нахождения  $\delta Z$ .

Если считать деформацию сжимаемого образца упругой, то

$$\frac{\delta b}{b} \approx \frac{3p}{B},$$

что дает для абсолютного значения  $|\delta Z|$  приближенное значение

$$|\delta Z| \approx Z \frac{3p}{B}.$$

Обратимся к численным оценкам. Для алюминия ( $Z = 13$ ) упругий модуль  $B \approx 10^{12} \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$  или, если перейти к атомным единицам,  $B \approx 1/30$ . Таким образом, заряд, передаваемый одной атомной ячейкой образца, к которому приложено давление  $p$ , ячейке другого образца, по принятой грубой оценке (в атомных единицах), порядка

$$\delta Q \approx e \delta Z \approx 1.3P.$$

\*)  $\delta Z$  не обязательно целое.

Если сжимаемый образец содержит примерно  $N \approx 10^{24}$  атомов, то полный заряд, протекающий через гальванометр,

$$\Delta Q \approx N \delta Q.$$

При длительности перераспределения зарядов после замыкания цепи порядка  $\tau$  средняя сила тока через гальванометр  $i \approx \frac{\Delta Q}{\tau}$ .

Если принять  $\tau \approx 0.1$  с, а давление  $p = 10^{-3}$  [а.е.]  $\approx 3 \cdot 10^{14} \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$  и перейти к техническим единицам, то для  $i$  получается оценка

$$i \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ А.}$$

Упомянем еще о двух вариантах возможной постановки лабораторных исследований бароэлектрического эффекта.

Один из них почти полностью тождествен методу, предложенному Кельвином для измерения контактных разностей потенциалов [6]. Напомним идею этого метода. Если измерять расстояние  $d$  между обкладками конденсатора, изготовленными из металлов, контактная разность потенциалов между которыми равна  $V$ , то изменяется и поверхностная плотность зарядов на обкладках  $\sigma = \frac{V}{4\pi d}$ , а значит, и их полный заряд  $Q = \sigma S$ , так что по проводнику, соединяющему обкладки, потечет ток  $I = \frac{\partial Q}{\partial t}$ , который можно измерить.

Если обкладки изготовлены из химически тождественного материала, но находятся под различными давлениями, то из-за различия объемной плот-

ности электронов в них между обкладками опять возникает разность потенциалов, но только уже не контактная, а «бароэлектрическая», а все остальное — как в методе Кельвина<sup>\*)</sup>. Поскольку метод Кельвина требует использования в экспериментальной установке движущихся частей, то потребность в них отпадает, если обратиться к оптическому методу, который широко используется при измерении работы выхода по положению красной границы фотоэффекта. Единственное новое здесь — исследование положения этой красной границы в зависимости от давления, под которым находится металл.

<sup>\*)</sup> Близкий по идее эксперимент был выполнен П. Крейгом.

#### Литература

1. Лебедев П.Н. // Журн. Русск. физ.-хим. о-ва, часть физ. 1911. **43**. С. 484.
2. Sutherland W. // *Reestr. Magn. Planet Sci. and Atm. Electr.*, 1903. **8**. Р. 49.
3. Григорьев В.И., Григорьева Е.В., Ростовский В.С. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 1989. №5. С. 45 (*Moscow University Phys. Bull.* 1989. N 5. P. 43).
4. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М., 1995.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М., 1965.
6. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. 1. М., 1979.

Поступила в редакцию  
29.09.03