

— Опять наэлектризовалась, — вздыхаем мы, вынимая из проигрывателя пластинку, облепленную пылью. Слишком сухой воздух — и начинают электризоваться трущиеся о части ткацких и полиграфических машин нити, бумага, синтетические пленки; светочувствительные материалы засвечиваются — при электризации могут происходить электрические разряды, а они, как известно, светятся. Но если электризующуюся и липнущую к человеку одежду можно считать мелочью, то человеку, наэлектризованному от хождения по линолеуму, не до смеха — при приближении к металлическому оборудованию с его пальца срывается сантиметровая искра. Иногда достаточно снять с себя рубашку из синтетической ткани, чтобы при приближении руки в водопроводному крану получить ощутимый удар. А сколько чувствительных полупроводниковых приборов было испорчено электростатическими разрядами, пока не стали покрывать полы на монтажных участках проводящей краской.

Более серьезные последствия — и легко догадаться какие — могут быть

от трения шин о сухую дорогу. Если машина из-за трения о дорогу наэлектризуется, входящего или выходящего человека может «дернуть», а искра рядом с цистерной бензина может вызвать пожар. Поэтому не для красоты висят сзади машин-цистерн для горючих веществ цепи, волочащиеся по дороге. Да и у обычных автомобилей часто есть такая ленточка из проводящей резины... Опасна электризация трением в производственных помещениях, где присутствуют пары или пыль горючих веществ, — вызываемые ею разряды могут привести к взрывам. В США, например, с 1900 по 1959 год было зарегистрировано около двадцати таких взрывов: при этом погибло около десяти человек и был причинен ущерб на сумму два миллиона долларов. Есть от электризации трением и польза: это — простейший способ получения высоких напряжений. Помните электрофорную машину? А ее «старший брат» — генератор Ван-де-Граафа — еще не так давно был наиболее распространенным источником высоких напряжений (до 20 МВ). И наконец, электризация трением — по-видимому, первое электрическое явление, которое изучали люди.

Тысячи лет назад люди знали, что при трении некоторых веществ одно о другое они, как мы бы сейчас сказали, электризуются. Не исключено, что древнеегипетские и древнегреческие жрецы поражали публику зрелищем гребня, притягивающего кусочки папируса. Однако, несмотря на столь древнюю историю, с электризацией трением не все ясно до сих пор. Когда-то полагали, что есть некая электрическая жидкость, перетекающая от тела к телу при контакте, а тело с ее недостатком притягивается к телу с ее избытком.

Когда люди открыли электрон, они поняли, что наэлектризованное тело должно содержать избыток или недостаток электронов, и стали считать, что при трении электроны переходят от одного тела к другому. Но такое заключение было не вполне обосновано: в диэлектрике — на то он и диэлектрик — электроны не могут двигаться свободно. Существенный прогресс в понимании того, как происходит электризация трением, был достигнут в последнее десятилетие. Об этом и пойдет дальше речь. Эксперименты, о которых будет рассказано, выполнялись в 1969—1977 годах в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе в Ленинграде. Два цилиндрика из хороших диэлектриков (тефлон, янтарь, рубин, оргстекло), диаметром 10 мм и высотой 14 мм, прижимались один к другому торцами и вращались со скоростью 0,5 об/с один относительно другого (рисунок 1,а). Через три оборота измерялись заряды цилиндриков, для чего они разъединялись и по очереди помещались в камеру, соединенную с электрометром (рисунок 1,б); потом они опять ставились один на другой, делалось еще три оборота, опять измерялись заряды, и так далее. Оказалось, что исходно нейтральные образцы при трении заряжаются. Сумма их зарядов, однако, остается равной нулю. Следовательно, в процессе переноса зарядов не участвует «третий лишний».

Далее, оказалось, что при вращении цилиндриков заряды их сначала постепенно увеличиваются (у одного — отрицательный, у другого — положительный), а при скорости примерно тридцать оборотов в секунду стабилизируются. Простое касание цилиндриков переноса заряда не вызывает, то есть существенно именно

трение. Накопленный заряд сохраняется несколько недель, но только если держать образец в камере, лишенной доступа воздуха. На открытом воздухе заряд «утекает» за сутки — имеющиеся в воздухе ионы притягиваются к поверхностным зарядам образца и нейтрализуют их. (Между прочим, на этом эффекте основано действие одного из приборов, измеряющих дозу радиоактивного облучения: излучение ионизирует воздух, и образовавшиеся ионы нейтрализуют заряд на предварительно заряженном миниатюрном электроскопе: быстрая «спадания» листочков электроскопа может служить мерой радиоактивного излучения.) Если же образец лишен доступа воздуха, то нейтрализация поверхностных зарядов быстро прекращается, а из-за низкой собственной проводимости диэлектрика приток зарядов изнутри на поверхность образца практически нет.

Итак, почему разряжается образец, заряженный при электризации трением, понятно. Но почему он все-таки заряжается?

Приглядимся внимательнее к ионам, собирающимся на образце, и к самому образцу. Пусть наш образец — ионный диэлектрик, кристаллическая решетка которого состоит из ионов двух сортов, например  $\text{Li}^+\text{F}^-$ . Однако при его образовании получилось так, что вместо части ионов в нем пустые места — вакансии. Вакансии могут быть на месте ионов  $\text{Li}^+$  и на месте ионов  $\text{F}^-$ , и если количество вакансий не одинаково, то кристалл будет иметь собственный заряд. Раз есть собственный заряд, то к образцу притягиваются из воздуха ионы. Вместе с прилипшими к его поверхности молекулами воды и газов воздуха они образуют

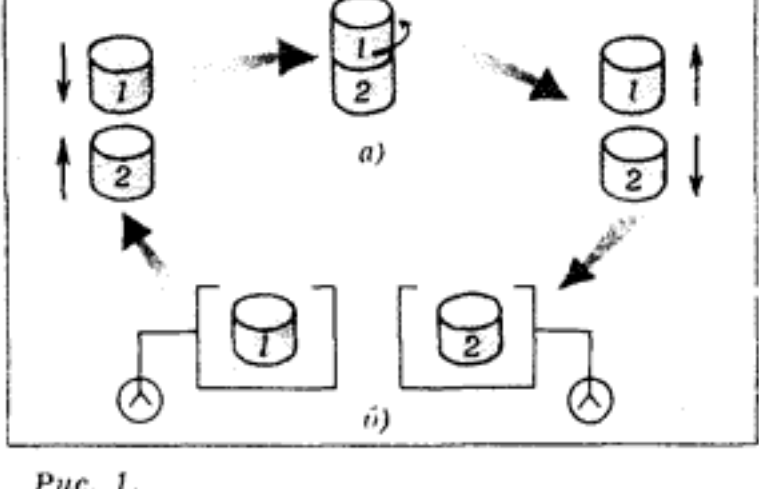


Рис. 1.

«шкурку». Заряд шкурки в точности равен собственному заряду образца, но, конечно, с обратным знаком (так что в целом образец нейтрален).

Остальное понятно — разные диэлектрики, разные собственные заряды и разные заряды шкурки. Потерли, перемешали шкурки — и получили заряженные куски.

Пусть, например, каждый цилиндрический образец имеет длину, равную диаметру. Тогда площадь торца будет составлять  $1/6$  от всей поверхности. Обозначим заряды шкурок на образцах (до трения)  $q_A$  и  $q_B$  и будем считать, что заряд каждой шкурки распределен по поверхности образца равномерно. Тогда после трения, когда шкурки на торцах перемешались и их заряды разделились поровну, полные заряды  $q'_A$  и  $q'_B$  новых шкурок будут состоять из  $5/6$  собственных старых зарядов и половины от суммы  $1/6 q_A$  и  $1/6 q_B$ :

$$q'_A = \frac{5}{6} q_A + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{6} q_A + \frac{1}{6} q_B \right) = q_A + \frac{1}{12} (q_B - q_A),$$
$$q'_B = \frac{5}{6} q_B + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{6} q_A + \frac{1}{6} q_B \right) = q_B + \frac{1}{12} (q_A - q_B).$$

Ясно, что раз заряд шкурки изменится (а это будет всегда, когда  $q_A \neq q_B$ ), то изменится и заряд образца в целом.

А могут ли электризоваться два куска одного и того же диэлектрика? Если они имеют одинаковые собственные заряды, то нет. Но они могут иметь разные собственные заряды, то есть содержать разные количества вакансий, если условия образования кусков различались (например, один кусок ионного диэлектрика образовывался в окружении паров какого-то из входящих в него элементов, так что заполнялись все вакансии на месте ионов этого элемента, а вокруг другого

куска давление паров было меньше, и вакансии на месте ионов остались). Поэтому и была обнаружена электризация при трении двух цилиндриков из одинакового, казалось бы, рубина.

Электризация происходит не только при трении. Фарадей писал в 1833 году, что электризация возникает при деформации кристаллов, в том числе при их раскалывании. Однако время для исследования этого процесса, видимо, тогда еще не пришло. Почти через сто лет, в 1930 году, было замечено, что электризуется при расщеплении слюда, но детальное изучение электризации при расщеплении началось спустя четверть века.

Как уже говорилось, кристалл диэлектрика «сам по себе», то есть с чистой поверхностью, без шкурки, не нейтрален. В нем есть вакансии, и, как правило, они распределены по кристаллу неравномерно. Заряд же шкурки, нарастающей на образец, во многих случаях можно считать распределенным по его поверхности почти равномерно. Когда мы ломаем кристалл пополам, половинки получают «в наследство» по половине объема и поверхности, а с ними — по полшкурки. Но заряд шкурки делится при этом честно, поровну, заряд же объема, если он был распределен неравномерно, делится не поровну. В этом случае заряды получившихся при расколе частей будут иметь противоположные знаки, так как у одной части заряд шкурки будет больше собственного (объемного), а у другой — меньше. Но есть и другая причина неравномерного деления заряда.

Кристалл  $\text{LiF}$  устроен простейшим из возможных способов: кубическая решетка, ионы  $\text{Li}^+$  и  $\text{F}^-$  чередуются вдоль любой оси. При ударе кристалл раскалывается обычно по плоскости,

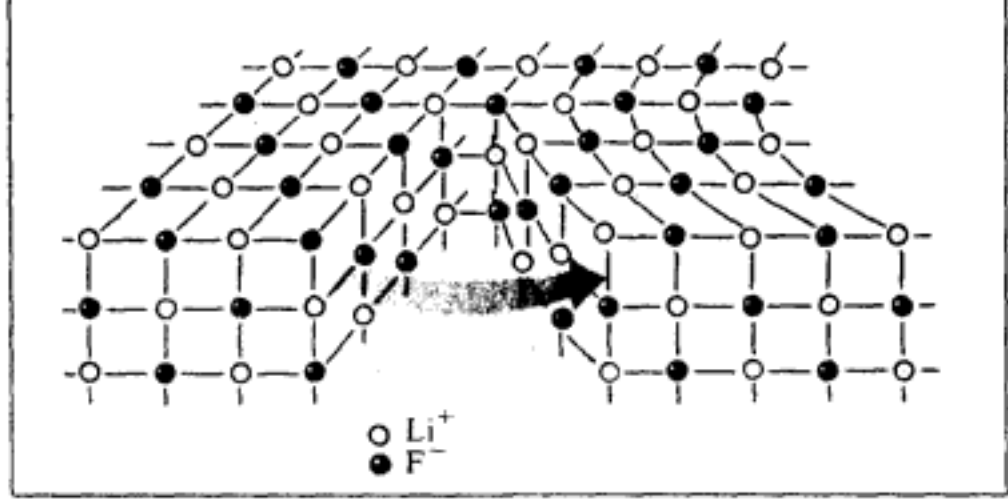


Рис. 2.

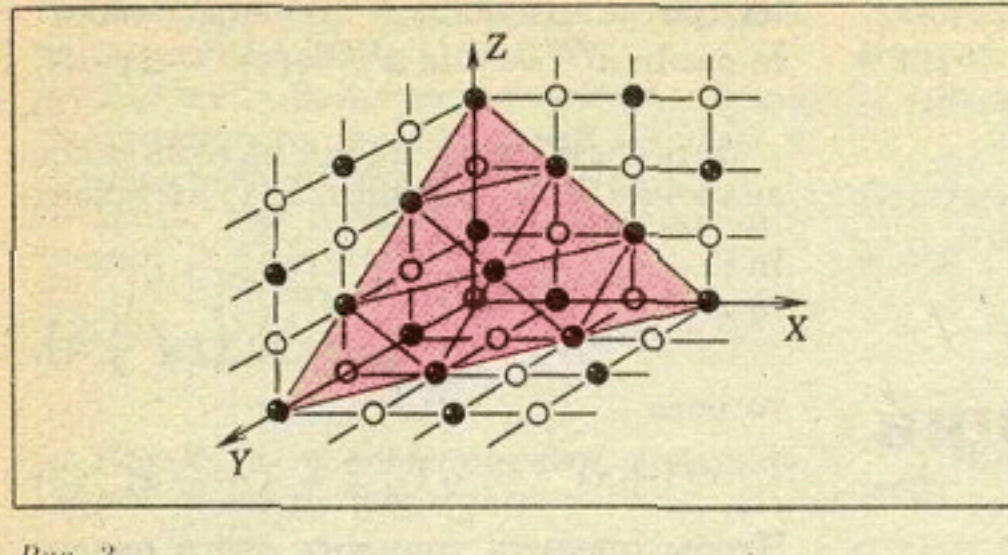


Рис. 3.

перпендикулярной осям кристаллической решетки (рисунок 2). Но иногда направление трещины может измениться, и она пойдет по диагонали в плоскости, в которой лежат ионы одного сорта (рисунок 3).

В этом случае на одной поверхности трещины сразу после раскола окажутся ионы одного знака, а на другой — противоположного. И действительно, при движении зонда электрометра вдоль поверхности раскола такие участки были обнаружены.

Но значительно более сильное неравенство зарядов отдельных кусков было обнаружено при расколе образца на неодинаковые части. Действительно, пусть длинный кристалл с квадратным торцом со стороны, равной  $a$ , и длиной  $l \gg a$  (рисунок 4) раскалывается на две части, толщины которых  $b$  и  $a-b$ . Если  $q$  — средняя плотность собственного объемного заряда целого кристалла, то поверхностная плотность  $\sigma$  заряда шкурки вычисляется из условия равенства нулю суммы зарядов:

$$Q_{\text{кристалла}} + Q_{\text{шкурки}} = 0.$$

Пусть площадь торцов мала и заряд

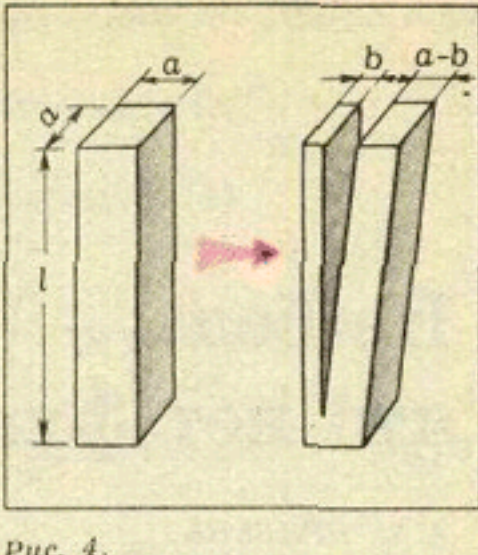


Рис. 4.

шкурки на них можно не учитывать. Тогда

$$4al\sigma + qla^2 = 0.$$

Отсюда находим плотность заряда шкурки:

$$\sigma = -aq/4.$$

Считая, что плотность объемных зарядов левой и правой частей одинаковы (и равны  $q$ ), находим заряд, например, левой части, равной сумме объемного и поверхностного зарядов:

$$qabl - \frac{qa^2}{4} (a+b) = \frac{qa^2}{2} \left( b - \frac{a}{2} \right) < 0,$$

что и было обнаружено на опыте.

...Разумеется, это далеко не все, что можно рассказать о механизмах электризации. Массу интересных вопросов можно задать о моменте, когда трещина разделяет кристалл (электроны могут «перепрыгивать» со стенки на стенку), об острые сапфирового «рубина» (электроны могут переходить и на него), наконец, о механизме электризации при трении диэлектрика по металлу, о механизме электризации при сжатии кристаллов и так далее. На некоторые из этих вопросов ответы уже получены. Остальные — ждут своего времени. И, может быть, вас.

## Задачи наших читателей

1. Докажите, что не существует натуральных чисел  $x, y, z$  таких, что  $x^{p-1} + y^{p-1} = z^{p-1}$ , где  $p$  — простое,  $p > 3$ , а  $x$  и  $y$  не делятся на  $p$ . Указание: примените Малую теорему

Ферма:  $a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$ , где  $a$  — натуральное и  $(a, p) = 1$  (см. «Квант», 1978, № 10, с. 7).

2. Докажите, что при  $p=3$  любое решение диофантова уравнения  $x^{p-1} + y^{p-1} = z^{p-1}$ , состоящее из парно взаимно простых натуральных чисел, содержит число кратное 3.

О. А. Черепанов