

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

539.374.1(018)

**ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ИОННОГО КРИСТАЛЛА
ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАСЩЕПЛЕНИИ****М. И. Корнфельд**

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	327
2. Поле наэлектризованного тела	328
3. Избыточные электрические заряды	329
4. Электризация при расщеплении	331
5. Электризация при пластической деформации	334
6. Контактные явления	338
Цитированная литература	339

1. ВВЕДЕНИЕ

Уже Фарадей знал, что некоторые кристаллы электризуются при деформации и расщеплении. Он писал в 1833 г.: «Под обыкновенным электричеством я понимаю такое, которое можно получить от обычной машины, или из атмосферы, или посредством давления или расщепления кристаллов...»¹. Следующие упоминания об этом явлении появились через сто лет. В 1930 г. Обреимов² заметил, что слюда электризуется при расщеплении. В 1933 г. Степанов³ обнаружил электризацию каменной соли при пластической деформации.

Эффект Степанова воспроизвели в 1955 г. Фишбах и Новик⁴ и Каф-фин и Гудфеллоу⁵. Он был подвергнут затем дальнейшему изучению^{6-13*}.

Эти работы показали, что электризация (в ионных кристаллах) возникает при любом виде пластической деформации — сжатии, растяжении, изгибе, ударе индентора и т. п.; во всех случаях на металлическом электроде, приклеенном или прижатом к деформируемому кристаллу, появляется электрический заряд.

Авторы работ не сочли нужным обсудить этот факт с позиций закона сохранения заряда, и вопрос о происхождении заряда остался открытым. Между тем, только следующие возможности не противоречат закону сохранения:

— заряд возникает вследствие *перетекания электронов* из кристалла в электрод (или наоборот);

— заряд электрона является *индуцированным зарядом*, возникающим вследствие появления у кристалла электрического поля.

*) См. также более полный обзор Урусовской¹⁴.

В последнем случае, в свою очередь, имеются две возможности:

— электрическое поле появляется вследствие *изменения заряда кристалла*, например, в результате эмиссии электронов (или ионов) в окружающий воздух;

— электрическое поле появляется вследствие *поляризации кристалла*, т. е. в результате упорядоченного искажения его кристаллической решетки.

Эксперименты, о которых пойдет речь ниже, позволяют сделать выбор между этими возможностями. Но сначала полезно рассмотреть некоторые общие вопросы, относящиеся к любым наэлектризованным телам.

2. ПОЛЕ НАЭЛЕКТРИЗОВАННОГО ТЕЛА

Мы говорим, что твердое тело наэлектризовано, если оно обладает электрическим полем. Последнее возникает, когда либо полный заряд тела, либо расстояние между «центрами тяжести» разноименных составляющих заряда не равны нулю.

В обоих случаях поле может быть вычислено. Проиллюстрируем это на примере диэлектрического тела, имеющего форму диска (для тела иной формы вычисление крайне громоздко).

Обозначив радиус диска через a , толщину через h , будем искать напряженность поля в точке, расположенной вдоль оси диска на расстоянии l от его поверхности. Рассмотрим две задачи, отвечающие двум упомянутым выше видам электризации:

а) *Избыточный заряд распределен равномерно с плотностью ρ в объеме диска*. В этом случае в силу однородности распределения заряда поляризация вещества диска практически отсутствует и элементарный расчет (без учета поляризации) приводит к следующему выражению для напряженности поля

$$E = 2\pi\rho h \left(1 - \frac{z_0 + z_*}{\sqrt{z_0^2 + 1} + \sqrt{z_*^2 + 1}} \right), \quad (1)$$

где $z_0 = l/a$, $z = z_0 + (h/a)$.

Отсюда легко увидеть, что ничтожные отклонения от нейтральности вещества приводят к громадным электрическим полям. Примем, например, $h = a = 0,5$ см и $\rho = 50$ CGSE см³. Тогда поле вблизи поверхности диска будет равно ~ 100 ед. CGSE, т. е. 30 000 в/см. Между тем, указанная плотность заряда отвечает 10¹¹ электронным зарядам/см³, что в 10¹² раз меньше общего числа одноименных зарядов в кубическом сантиметре.

б) *Полный заряд диска равен нулю. Поле обусловлено смещением центров тяжести разноименных составляющих заряда*. Поле этого рода обладают, в первую очередь, некоторые классы ионных кристаллов: *пироэлектрики*, где центры тяжести положительных и отрицательных ионов смещены друг относительно друга сами по себе, и *пьезоэлектрики*, у которых смещение центров тяжести возникает при упругой деформации кристалла.

Зависимость напряженности поля от величины смещения может быть вычислена на основании предыдущей формулы. Допустим, в качестве гипотетического примера, что в кристалле фтористого лития решетка фтора сместилась относительно решетки лития на отрезок длины λ вдоль направления $\langle 100 \rangle$. Пусть при этом кристалл имеет форму диска и ось диска совпадает с упомянутым направлением.

Воспользовавшись формулой (1), в которой ρ обозначает теперь суммарный заряд одноименных ионов в 1 см³, найдем по-отдельности поля, обусловленные ионами лития и ионами фтора. Сложив эти поля и отбросив

члены высшего порядка малости, получим

$$E = \pm 2\pi\rho l \left(\frac{z_*}{\sqrt{z_*^2 + 1}} - \frac{z_0}{\sqrt{z_0^2 + 1}} \right). \quad (2)$$

Знак поля определяется знаком «ближней» решетки и тем самым различен по обе стороны диска.

Приведем, как и раньше, численный пример. Приняв по-прежнему $h = a = 0,5 \text{ см}$, $l \approx 0$ и положив $\rho = \pm 7,5 \cdot 10^{12} \text{ CGSE см}^3$ легко увидеть, что поле ~ 100 ед. CGSE возникает при смещении решеток всего на две десятитысячных доли межионного расстояния.

В заключение следует указать, что в действительности поле наэлектризованного тела редко достигает 100 ед. CGSE. При таких полях уже возможен тлеющий разряд и образующиеся в воздухе ионы, притягиваясь и прилипаая к поверхности тела, частично нейтрализуют его. Далее, при малых полях, нейтрализация происходит уже за счет ионов, всегда присутствующих в атмосферном воздухе.

Таким образом, в обычных условиях поле не превышает нескольких десятков ед. CGSE и даже у хороших диэлектриков сохраняется на протяжении всего нескольких часов.

3. ИЗБЫТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ ¹⁵

Объектом исследования на протяжении всей работы служили кристаллы фтористого лития. В самом начале, в процессе изготовления образцов, выяснилось, что кристаллы электризуются при раскалывании. Исследование этого явления (уже упоминавшегося во введении) распадается на два этапа.

В первом из них изготовление образцов производилось с помощью приспособления, показанного схематически на рис. 1. Кристалл ставится на торец заземленного латунного цилиндра. Сверху на цилиндр 1 надевается легко скользящая по нему латунная трубка 2, несущая стальной нож 3. Требуемое положение ножа достигается поворачиванием трубки вокруг оси. Затем в трубку вставляется пробка 4. Резкий удар по пробке приводит к раскалыванию кристалла на две части. Одна из них вынимается и кладется на заземленный латунный столик, другая раскалывается дальше, затем то же самое делается с первой частью и т. д. Каждый полученный таким путем образец вносится в камеру измерительного устройства для определения заряда.

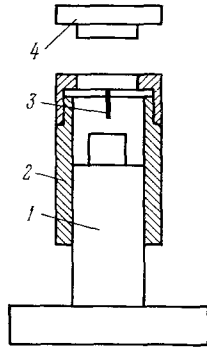


Рис. 1. Приспособление для раскалывания образцов.

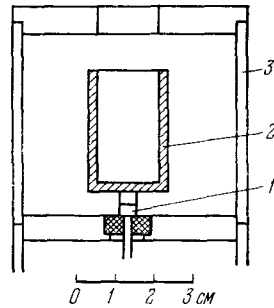


Рис. 2. Устройство для измерения заряда. 1 — вход электрометра, 2 — камера, 3 — экран.

Как эта, так и все предыдущие манипуляции, производятся пинцетом с гладкими платиновыми наконечниками; пинцет, при помощи тонкого гибкого проводника, заземлен.

Устройство для измерения заряда состоит из камеры, непосредственно присоединенной к электрометру, и заземленного экрана (рис. 2). Обозначив емкость камеры (вместе с электрометром) через C , потенциал камеры

при нахождении в ней образца через U , легко найти заряд образца:

$$q = \frac{C}{300} U, \quad (3)$$

где q — выражено в ед. CGSE, U — в в, C — [в см *).

Измерения показали, что образцы, принадлежащие одному и тому же кристаллу, отличаются друг от друга, как по абсолютной величине заряда, так и по его знаку. Это обстоятельство определило способ обработки экспериментальных данных.

Из одного куска кристалла выкалывается 40 образцов (по возможности одинакового размера). Найденные для них значения заряда распола-

гаются в порядке возрастания: $q_1 < q_2 < q_3 < \dots < q_N$. Далее строится график, в котором каждому q на оси абсцисс отвечает на оси ординат свое y , найденное с помощью стандартных статистических таблиц из уравнения

$$\frac{i}{N+1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y_i} e^{-x^2/2} dx.$$

В том случае, когда распределение образцов по величине заряда подчиняется нормальному закону

$$p(q) = \frac{1}{\beta \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{q - \bar{q}}{2\beta^2}\right),$$

зависимость y от q выражается прямой линией.

Поэтому, построив упомянутый график, легко проверить, подчиняется ли распределение нормальному закону и, когда это так, непосредственно из графика найти \bar{q} и β . Первая из этих величин отвечает точке пересечения прямой с осью абсцисс, вторая — тангенсу угла наклона прямой к оси ординат¹⁶.

Рис. 3. График $y(q)$: заряды образцов выколотых заземленным стальным ножом (в ед. CGSE).

На рис. 3 приведен такой график для одного из исследованных кристаллов. В дальнейшем удалось показать, что значительную роль в образовании зарядов играет перераспределение свободных электронов между ножом и кристаллом в процессе раскалывания. В соответствующих опытах раскалывание производилось стальным ножом, укрепленным через посредство тефлонового изолятора на латунном держателе (рис. 4). Такой нож можно ввести в электрометрическую камеру через верхнее отверстие в экране (см. рис. 2).

Было выполнено 40 раскалываний. После каждого из них определялся потенциал камеры при введении в нее ножа. Разность между предыдущим и последующим значениями потенциала характеризует величину заряда, перешедшего от ножа к кристаллу при данном раскалывании. График рис. 5, построенный на основании полученных таким путем чисел, близок во всех отношениях к графику рис. 3.

*) Конструкция электрометра и размеры камеры менялись на протяжении работы. В соответствии с этим емкость в разных экспериментах менялась от 4 до 5 см.

Отсюда с полной определенностью следует, что возникновение избыточных зарядов, по крайней мере частично, обязано процессу перераспределения электронов между ножом и кристаллом. Чем вызван этот процесс и почему при строго регламентированной экспериментальной процедуре

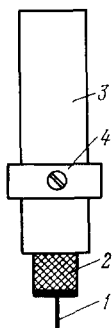


Рис. 4. Стальной нож на изоляторе. 1 — нож, 2 — тefлоновый изолятор, 3 — держатель. 4 — стопорное кольцо.

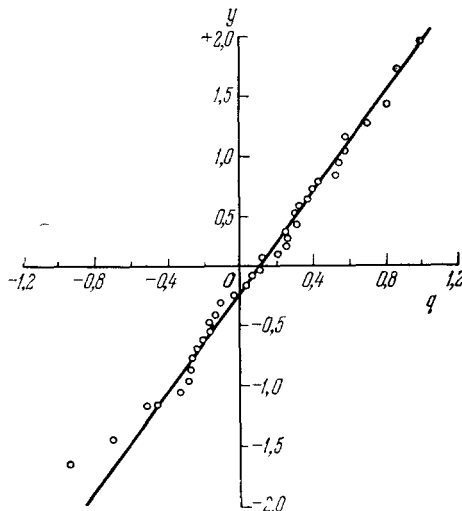


Рис. 5. График $y(q)$: заряды ножа, возникающие при раскалывании (в ед. CGSE).

он приводит к столь сильно отличающимся результатам у разных образцов, выяснилось позже; оказалось, что при выкалывании образец несколько деформируется и вследствие этого приобретает необычные контактные свойства (см. раздел 6).

Чтобы исключить этот «побочный» механизм образования зарядов следует, очевидно, раскалывать кристалл диэлектрическим ножом.

4. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ПРИ РАСЩЕПЛЕНИИ ¹⁷

В последующих опытах применялся сапфировый нож; в отличие от стального ножа он не приобретает заряда при раскалывании.

Соответствующее устройство изображено на рис. 6. Кристалл — 1, стоящий на полированной сапфировой *) пластинке 2, раскалывается сапфировым ножом 3. Благодаря наличию стопорного кольца 4 смещение ножа при ударе не превышает 1—2 мм. Части расколотого образца остаются в кварцевой трубке 5. Последующие манипуляции с ними производятся при помощи пинцета с сапфировыми наконечниками.

Образцы имели размеры $5 \times 5 \times 20$ мм³. Сперва образец вносится в электрометрическую камеру для определения его исходного заряда. Далее он устанавливается вертикально под ножом и раскалывается вдоль на две примерно равные части. Сначала одна из них вносится в камеру для определения заряда. Затем к ней присоединяется вторая и определяется суммарный заряд обеих частей вместе. Результаты измерений сведены в табл. I и II.

*) Имеется в виду монокристаллический лейкосапфир.

Таблица I

Изменение полного заряда образца при раскальвании (в ед. CGSE)

№	До	После	Разность	№	До	После	Разность
1	+0,04	+0,72	+0,68	11	-0,03	+1,02	+1,00
2	+0,18	+1,15	+0,97	12	+0,39	+0,88	+0,49
3	+0,07	+0,31	+0,24	13	+0,21	+0,97	+0,76
4	+0,36	+0,76	+0,40	14	+0,21	+2,10	+1,89
5	+1,10	+1,24	+0,14	15	+0,07	+0,51	+0,44
6	+0,60	+0,92	+0,32	16	+0,09	+0,67	+0,58
7	-0,10	-0,11	0	17	+0,07	+1,05	+0,98
8	+0,35	+0,66	+0,31	18	0	+1,25	+1,25
9	+0,21	+1,80	+1,59	19	+0,18	+0,87	+0,69
10	0	+1,20	+1,20	20	+0,35	+0,24	-0,11

Таблица II

Заряды частей расколотого образца (в ед. CGSE)

№	I	II	№	I	II	№	I	II
1	-1,20	+1,92	8	+0,54	+0,12	15	+0,42	+0,09
2	+1,65	-0,50	9	-3,30	+5,10	16	+2,40	-1,74
3	+3,30	-3,00	10	+4,65	-3,45	17	+1,42	-0,36
4	+1,60	-0,90	11	-1,80	+2,82	18	+0,57	+0,69
5	-2,40	+1,15	12	-0,87	+1,75	19	+2,70	-1,83
6	+0,99	-0,07	13	+1,50	-0,53	20	+2,40	-2,16
7	+2,25	-2,13	14	-1,95	+4,05			

В табл. I для каждого образца указаны: исходный заряд до раскальвания, суммарный заряд обеих частей после раскальвания и разность

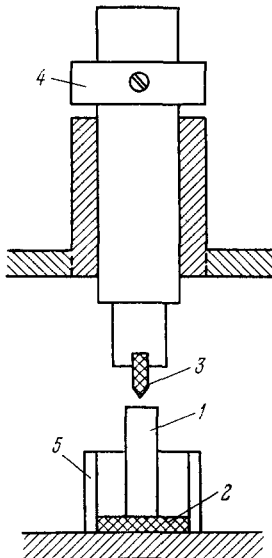
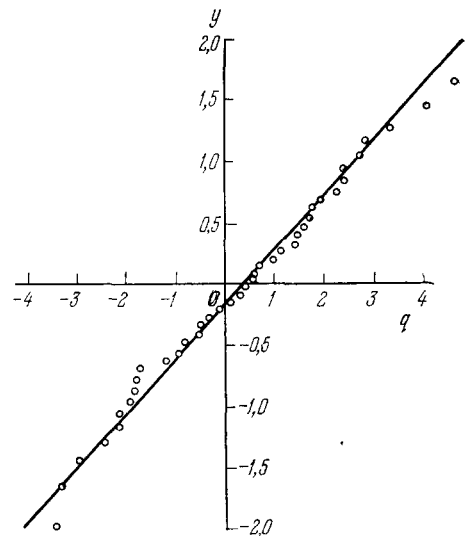


Рис. 6. Устройство для раскальвания кристаллов сапфировым ножом.

Рис. 7. График $y(g)$: заряды частей расколотых образцов (в ед. CGSE).

между этими числами. Из таблицы видно, что в результате раскальвания образец приобретает положительный заряд, равный в среднем $+0,6 \pm 0,4$ CGSE.

Этот факт можно объяснить эмиссией электронов со вновь образовавшихся поверхностей. Более вероятно, однако, что заряд появляется вследствие частичной потери адсорбированных ионов компенсирующих собственный заряд образца.

В табл. II для каждого образца приведены отдельно заряды обеих его частей. Числа таблицы обработанные изложенным ранее способом представлены на рис. 7. Все они хорошо ложатся на одну общую прямую. Если из этих чисел вычесть найденную выше постоянную составляющую $+ 0,6$ CGSE,¹ то прямая сместится влево и пройдет через начало координат. Отсюда следует, отвлекаясь от постоянной составляющей, что при раскалывании кристалла одна из его частей приобретает положительный заряд, а другая — точно такой же отрицательный.

Трудно поверить, что каждый раз при раскалывании образца нож попадает на границу раздела противоположно заряженных областей кристалла (если даже такие области существуют). Приходится заключить поэтому, что заряды возникают в процессе раскалывания вследствие перераспределения электронов или ионов между стенками бегущей трещины.

Разделение зарядов можно объяснить несовершенством кристалла. Допустим, например, что трещина раскола, встретившись со структурным дефектом и отклонившись от плоскости спайности $\{100\}$, обнажит небольшой участок кристаллографической плоскости $\{111\}$. В этом случае на одной стенке трещины появится «пятно», состоящее из ионов металла, на другой — такое же пятно из ионов галогена (в плоскости $\{111\}$ слои металла перемежаются со слоями галогена). Свежие сколы будут, следовательно, усеяны заряженными центрами обоих знаков и если случайно на одном из сколов окажется избыток положительных зарядов, то на другом сколе возникнет избыток отрицательных.

При таком механизме электризации поверхности, распределение заряда на одном сколе должно являться зеркальным отражением распределения на другом сколе. Для проверки этого соображения был поставлен соответствующий эксперимент.

Ко входу электрометра вместо камеры присоединяется зонд. Последний представляет собой стержень диаметром 0,6 мм, к нижнему концу которого припаяна под прямым углом тонкая никелевая пластинка размером $6 \times 1,5$ мм² *). Пластинка располагается на расстоянии $\sim 0,5$ мм от поверхности образца, как это показано на рис. 8. Столик, на котором лежит образец, может перемещаться (в плоскости рисунка) со скоростью 4 мм/мин. Таким способом образец «прогоняется» под зондом от одного своего конца до другого. Показания электрометра регистрируются при этом на ленте самописца.

Плотность зарядов на нижней поверхности «головки» зонда σ связана с напряженностью электрического поля образца E , соотношением $\mp \sigma = \pm E/2\pi$. Индуцированный заряд электрометра равен, следовательно, $\pm ES/2\pi$, где S — площадь головки. Отсюда результат измерения напряженности поля имеет вид

$$E = 2\pi \frac{C}{S} \frac{U}{300}; \quad (4)$$

*) В других опытах — диск диаметром 3,2 мм.

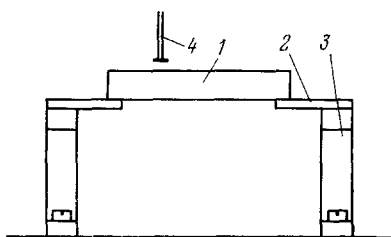


Рис. 8. Подвижный столик.
1 — образец, 2 — стеклянные пластинки, 3 — опоры, 4 — зонд.

здесь U — показания электрометра (потенциал зонда) в вольтах, C — емкость электрометра с зондом в см^{*}), E — напряженности поля в единицах системы СГСЭ.

В этой формуле игнорируется наличие стержня зонда. Между тем стержень, находясь также как и головка в поле образца, вносит некоторый вклад в показания электрометра. Этот вклад можно оценить повторяя измерения дважды: один раз с нормальным зондом, второй раз — с зондом без головки. Соответствующая поправка зависит от размеров и формы образца. Для образцов, о которых пойдет речь ниже, поправка достигает 20%. Поэтому в дальнейшем все результаты вычисления поля с помощью формулы (4) уменьшены на 20%.

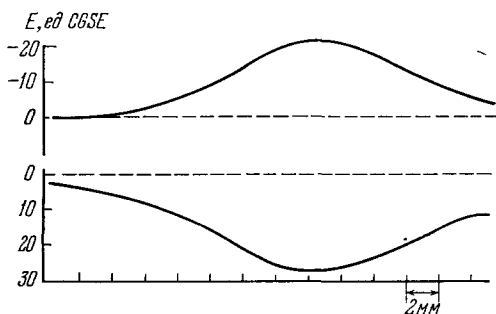


Рис. 9. Распределение поля (напряженность поля) у двух половинок расколотого образца.

Штриховые линии отвечают нулю поля.

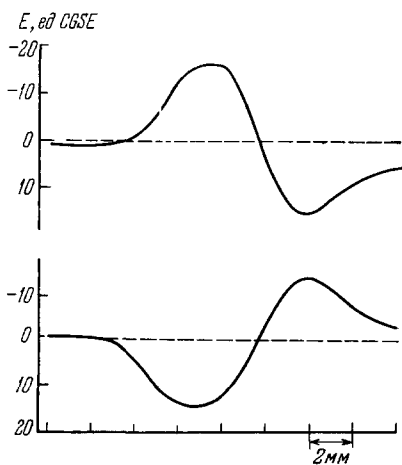


Рис. 10. То же, что на рис. 9 (редкий случай).

Опыты проводились следующим образом. Вблизи одного из концов образца на двух противоположных гранях наносятся метки (царапины). После этого образец ставится метками вниз в устройство рис. 6 и раскалывается на две примерно равные части так, чтобы на каждой из них оказалась своя метка.

Далее сперва одна половинка укладывается на столик свежим сколом вверх, меткой назад и прогоняется под зондом, а затем то же самое делается со второй половинкой. Эксперимент, повторенный на нескольких десятках образцов, подтвердил ожидание: у двух половинок расколотого образца записи распределения поля зеркально совпадают друг с другом, рис. 9 и 10 (как правило, знак поля не претерпевает изменений в пределах скола; нарушение постоянства знака наблюдалось только в одном случае). Таким образом рассматриваемый механизм возникновения избыточных зарядов находится в согласии с данными эксперимента.

5. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ¹⁸

Опыты проводились на образцах фтористого лития размером $15 \times 5 \times 5$ мм. Образцы выкалывались сериями по 10—15 штук из соседних участков кристалла. Деформация осуществлялась путем сжатия образца вдоль длинной оси. В качестве пресса используется микрометр со свободно вращающимися наконечниками^{*}). Для предотвращения проворачивания образца во время сжатия наконечник на неподвижном конце

^{*}) В данном случае $C \approx 5,5$ см.

^{**}) Такие микрометры применяются для измерения толщины бумаги.

микрометра стопорится. Приклеенные к торцевым поверхностям наконечников полированные сапфировые диски обеспечивают электрическую изоляцию образца.

Вращение винта микрометра осуществляется через посредство редуктора, мотором Уоррена. Скорость сжатия составляет 0,1 мм/мин. Микрометр и мотор с редуктором установлены на оптической скамье. Электрическое поле образца, возникающее в процессе деформации, измеряется зондовым методом. Электрометр установлен на той же оптической скамье, а его зонд находится над верхней гранью образца на расстоянии ~ 1 мм от нее (рис. 11).

При помощи толкателя, управляемого мотором, электрометр может перемещаться вдоль скамьи со скоростью 4 мм/мин. При этом зонд проходит над образцом от одного его конца до другого, а показания электрометра регистрируются на ленте самописца.

Экспериментальная установка позволяет измерять зависимость напряженности поля от степени деформации (при фиксированном положении зонда) и зависимость напряженности поля от положения зонда (при фиксированной степени деформации).

На рис. 12 и 13 представлены три характерных вида зависимости напряженности поля от степени деформации (зонд над серединой образца),

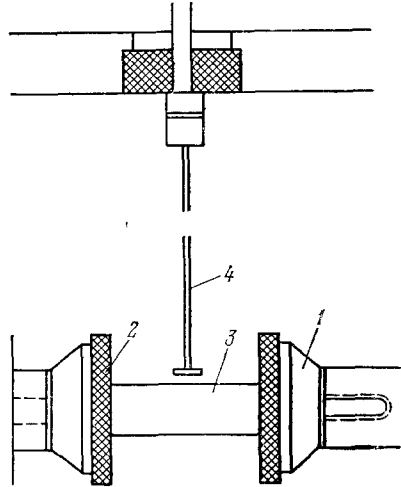


Рис. 11. Элементы экспериментальной установки.

1 — наконечник микрометра, 2 — сапфировый диск, 3 — образец, 4 — зонд.

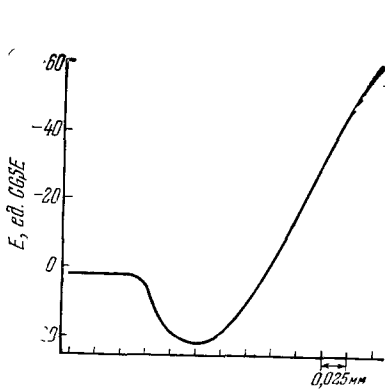


Рис. 12. Зависимость напряженности поля от степени деформации образца. Одно деление на оси абсцисс отвечает смещению винта микрометра на 0,025 мм.

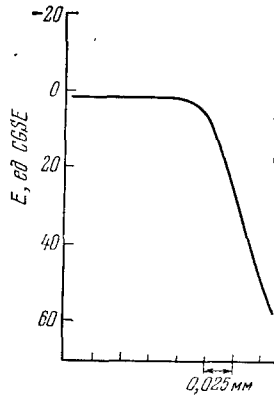
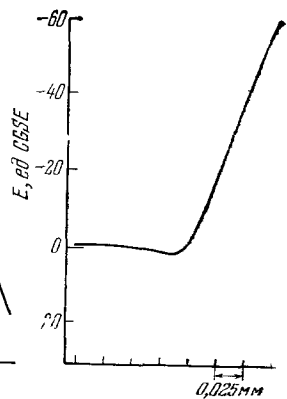


Рис. 13. То же, что на рис. 12, — два крайних случая.



а на рис. 14 и 15 зависимость напряженности поля от положения зонда у разных образцов и при различных степенях деформации.

Разнообразные и непредсказуемые вариации обеих зависимостей обусловлены, по-видимому, неоднородностью образцов и неизбежными перекосами при их сжатии в прессе.

Дальнейшие опыты имели своей целью выяснить, изменяется ли поле деформированного образца при снятии нагрузки. После окончания записи

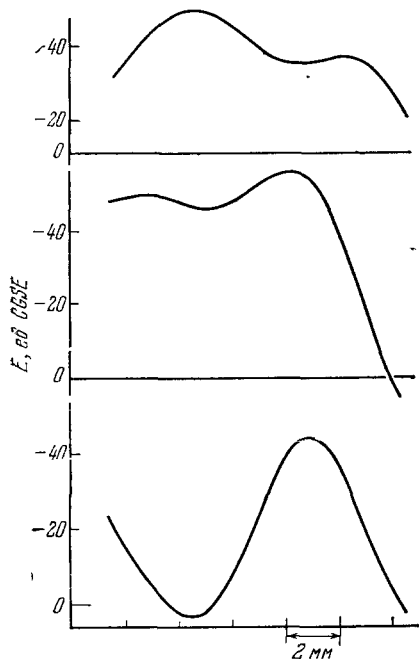


Рис. 14. Распределение поля у трех деформированных образцов. Степень деформации (снизу вверх): ,37; 0,25 и 0,35 мм сжатия.

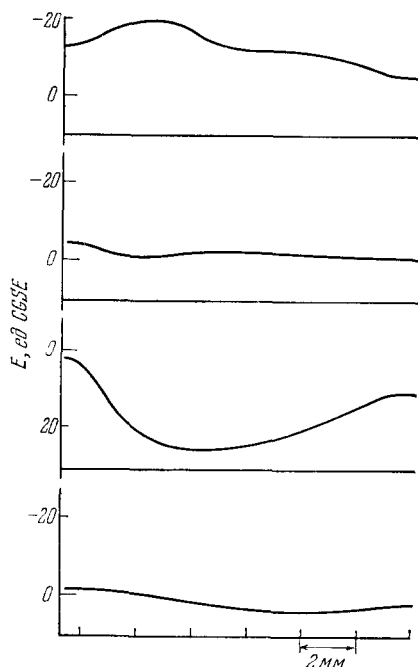


Рис. 15. Распределение поля у деформируемого образца. Первая запись снизу относится к исходному состоянию; вторая, третья, четвертая — к последующим стадиям деформации.

пресс с образцом убирается со скамьи и вместо него под зонд подводится сапфировый столик. Образец освобождается из прессы и укладывается при

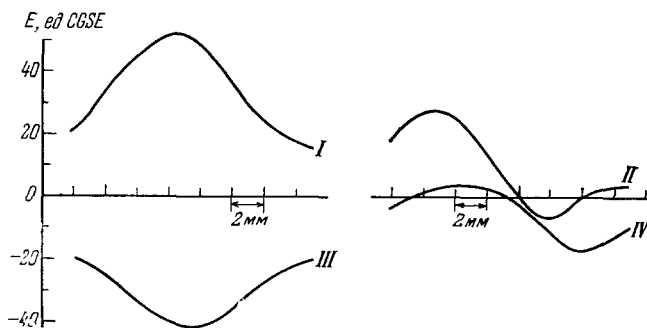


Рис. 16. Распределение поля вдоль четырех длинных граней деформированного образца.

помощи пинцета с сапфировыми наконечниками на этот столик. Электрометр приводится затем в движение и его показания снова регистрируются самописцем. Сравнение этой записи с первоначальной показывает, что поле образца не изменяется при снятии нагрузки.

В следующей серии опытов аналогичным образом записывалось распределение поля вдоль всех четырех длинных граней деформированного образца. На рис. 16 приведен для примера такой «комплект» записей:

кривые, относящиеся к противоположным граням, скомпонованы вместе. Из кривых видно, что поле деформированного образца вблизи одних участков поверхности положительно, вблизи других — отрицательно, в то время как суммарное поле близко к нулю. Отсюда следует заключить, что полный заряд образца не изменяется при пластической деформации.

Опыты, о которых пойдет речь ниже, были предприняты для проверки этого заключения. К исходному недеформированному образцу, немного отступя от его концов, приклеиваются концы тонкой капроновой нити (длиной 20 см). На этой нити при помощи специального штатива образец опускается в электрометрическую камеру для измерения начального заряда. Затем образец осторожно извлекается из камеры и подвешивается между сапфировыми дисками микрометра. Здесь образцу сообщается желаемая степень деформации, после чего он снова опускается в камеру для измерения конечного заряда. В табл. III приведены полученные результаты.

Таблица III

Изменение заряда образца при деформации

№	Сна- тие, мм	q, CGSE			№	Сна- тие, мм	q, CGSE		
		До	После	Разность			До	После	Разность
1	0,10	+0,06	+0,37	+0,31	6	0,20	+0,37	+0,57	+0,20
2	0,15	+0,57	+0,72	+0,15	7	0,25	+0,16	+0,98	+0,82
3	0,15	+1,05	+1,9	+0,85	8	0,20	+0,28	+0,75	+0,47
4	0,15	+0,30	+0,72	+0,42	9	0,30	+0,23	+0,67	+0,44
5	0,20	+0,41	+0,40	-0,01	10	0,20	+0,30	+0,60	+0,30

Вычисления показывают, что поле образца связано с его зарядом (равномерно распределенным в объеме или на поверхности) соотношением $E \approx 3q$. Отсюда, используя данные последнего столбца таблицы, легко увидеть, что поле обусловленное приобретенным зарядом не превышает 2—3 ед. CGSE. Между тем, наблюдаемые поля в 10—20 раз больше. Расхождение свидетельствует о том, что в результате пластической деформации кристалл поляризуется — при неизменном, близком к нулю заряде у него появляется электрическое поле.

Этот факт имеет простое объяснение. Пластически деформированный кристалл пронизан дислокациями. Ядра дислокаций, равно как и упругие искажения решеток в промежутках между ними, неизбежно нарушают локальную компенсацию зарядов разноименных ионов. Вследствие этого в некоторых местах возникают соответствующие электрические поля. Поскольку дислокации ориентированы в кристалле определенным образом, то эти поля обладают преимущественной ориентацией, а их суперпозиция образует электрическое поле кристалла в целом.

Из гл. 2 следует, что такое (по величине) поле может быть получено смещением решеток разноименных ионов на десятитысячную долю меж-ионного расстояния. Смещения ионов в искаженной решетке пластически деформированного кристалла имеют в среднем тот же порядок величины. Таким образом есть все основания считать деформированный кристалл своеобразным пирозлектриком. Заметим здесь же, что в процессе деформации, благодаря наличию эквивалентных систем скольжения, в кристалле может возникнуть несколько областей, отличающихся направлением смещения решеток. Тем самым деформированный кристалл является, как правило, полидоменным пирозлектриком, доменная структура которого в сильнейшей степени зависит от условий деформирования. Это обстоятель-

ство усложняет картину электрического поля кристалла и придает ей непредсказуемый характер.

Укажем еще, что любой пьезоэлектрик является одновременно и пьезоэлектриком *). Тем самым пластически деформированный кристалл должен обладать пьезоэлектрическими свойствами — деформироваться при воздействии электрического поля и электризоваться при деформировании (в упругой области!). Имеется ряд экспериментальных работ, в которых оба эффекта непосредственно наблюдались (см., например, ^{12, 20, 21}).

6. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ^{18, 22}

Вследствие наличия собственного поля пластически деформированный кристалл обладает необычными контактными свойствами. Приближая к поверхности образца зонд электрометра, можно наблюдать иногда электрический пробой воздушного промежутка. Возникающие при этом ионы притягиваются к поверхности, и оседая на ней, изменяют заряд образца. Прикосновение зонда приводит к изменению заряда образца и при меньших полях — в отсутствие искры.

Этот эффект был подвергнут более обстоятельному изучению с помощью той же методики.

Исследовались такие же деформированные образцы, как и в предыдущих опытах. Таким же способом образец укладывался на сапфировый столик и подводился под зонд электрометра.

В данном случае использовался, однако, контактный зонд, который в отличие от применявшегося ранее зонда имеет вместо обычной головки упругую петлю из платиновой проволоки (диаметр проволоки 0,1 мм). В начале измерения столик плавно поднимается до соприкосновения петли с поверхностью образца. По истечении некоторого времени контакта столик опускается и образец убирается. Во время этой процедуры делаются два отсчета показаний электрометра — непосредственно перед соприкосновением образца с зондом и после полного удаления образца. Первый отсчет дает информацию о знаке поля и грубо о его величине — поскольку зонд не предназначен для измерения поля. Второй отсчет позволяет определить знак и величину остаточного заряда электрометра. Этот заряд (с обратным знаком) равен заряду, приобретенному образцом при контакте. Многочисленные измерения показали, что во всех случаях знак приобретенного заряда противоположен знаку поля, а его величина, как правило, пропорциональна напряженности поля. Следовательно на участке поверхности, отвечающем положительному знаку поля, свободные электроны втягиваются в кристалл; на участке, отвечающем отрицательному знаку поля, — выталкиваются из него. Суждение о численных значениях приобретенного заряда дает табл. IV.

Т а б л и ц а IV

Заряды, приобретенные образцом при контакте
(в ед. CGSE)

−0,11	−3,1	+0,79	+0,75
−3,4	+2,2	+2,6	+0,37
+0,4	−0,64		

Степень деформации образцов 0,2—0,3 мм сжатия; каждый образец испытывался один раз; продолжительность контакта 10 сек; измерения, при которых имел место электрический пробой, не приводятся.

*) Но пьезоэлектрик может и не быть пьезоэлектриком ¹⁹.

Из таблицы видно, что эффект велик и должен приниматься во внимание во всех случаях, когда деформированный или деформируемый кристалл соприкасается с металлическими телами — с ножом, пинцетом, электродами и т. п.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. Фарадей, Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1, М., Изд-во АН СССР, 1947, § 284.
2. I. W. Obreimoff, Proc. Roy. Soc. A127, 290 (1930).
3. A. W. Степанов, Zs. Phys. 81, 560 (1933).
4. D. B. Fischbach, A. S. Nowick, Phys. Rev. 98, 1543, 99, 1333 (1955).
5. I. E. Caffin, T. L. Goodfellow, Nature 176, 878 (1955).
6. D. B. Fischbach, A. S. Nowick, J. Phys. Chem. Sol. 5, 302 (1958).
7. F. Rueda, W. Dekeyser, Phil. Mag. 6, 359 (1961); J. Appl. Phys. 32, 1799 (1961).
8. I. E. Caffin, T. L. Goodfellow, Proc. Phys. Soc. A79, 1285 (1962); Phil. Mag. 7, 1257 (1962).
9. F. Rueda, W. Dekeyser, Acta Met. 11, 35 (1963).
10. И. Кишш, Кристаллография 10, 890 (1965).
11. F. Rueda, W. Dekeyser, Phys. Stat. Sol. 17, 739 (1966).
12. Р. ДеБатист, Э. Ван Дингенен, Ю. Н. Мартышев, И. М. Сильвестрова, А. А. Урусовская, Кристаллография 12, 1012 (1967).
13. C. N. Ahlquist, L. Carlsson, Scripta Met. 6, 1129 (1972).
14. А. А. Урусовская, УФН 96, 39 (1968).
15. М. И. Корнфельд, ФТТ 10, 2422 (1968); 12, 318 (1970).
16. Д. Худсон, Статистика для физиков, М., «Мир», 1970.
17. М. И. Корнфельд, ФТТ 13, 474 (1971); 16, 3385 (1974).
18. М. И. Корнфельд, ФТТ 15, 3014 (1973); 16, 180 (1974).
19. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, М., Гостехиздат, 1957.
20. R. L. Sproull, Phil. Mag. 5, 815 (1960).
21. Б. К. Кардашев, С. П. Никаноров, О. А. Воинова, ФТТ 16, 1068 (1974).
22. М. И. Корнфельд, ФТТ 16, 311 (1974).