

Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках

© В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов, А.В. Пономарев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 13 января 1997 г.)

Исследовались электрические поля в природных диэлектриках при механическом нагружении и при электрической поляризации. Показано, что релаксация поляризации в обоих случаях идентична по природе и имеет в основе термоактивационный процесс. Получена температурная зависимость времени релаксации электрических полей. Оценена энергия активации движения носителей зарядов, приводящего к релаксации электрических полей.

При деформировании ионных кристаллов [1–3] природных диэлектриков (горных пород) [4,5] возникает электрическая поляризация, которая релаксирует в течение десятков и даже сотен секунд. Природа возникающего электрического поля не до конца ясна. Если в ионных кристаллах его можно связать с движением заряженных дислокаций [2,3], то в горных породах в упругой области деформирования трудно предположить перемещение хорошо закрепленных дислокаций.

В настоящей работе сделана попытка сопоставить поляризацию при механическом нагружении диэлектриков с поляризацией при приложении к ним слабых электрических потенциалов. Основными объектами исследования были стекло и мрамор, которые не обладают пьезоэлектрическими свойствами, усложняющими картину. На рис. 1 приведена схема эксперимента. Образец 1 выпиливался в виде призмы размером $50 \times 50 \times 100$ мм и устанавливался на металлическую платформу через изолятор из прочной керамики. Электрический потенциал от источника постоянного напряжения посредством электродов, которые изготовлялись из эпоксидной смолы с серебряным порошком, подавался на образец. Они обеспечивали хороший контакт и слабые контактные потенциалы. Механическое нагружение осуществлялось сжимающей нагрузкой P , не превышающей 0.5 от разрушающей.

Измерения индуцированного электрического потенциала производились бесконтактным способом при помощи высокочувствительного электрометра (ЭМ) (усилитель постоянного тока с большим входным сопротивлением $\sim 10^{14} \Omega$). Регистрирующим элементом был зонд 3 в виде диска диаметром 5 мм, экранированный с трех сторон для уменьшения помех. Основные параметры ЭМ: полоса рабочих частот $f = 10^{-5} - 10^6$ Hz, время стекания индуцированного заряда через входную цепь ЭМ $\tau = 2 \cdot 10^4$ с, чувствительность $U_{\min} = 0.05$ mV.

Если зонд поднести к электроду, например, положительного знака, в нем индуцируется заряд q противоположного знака. Потенциал φ на зонде связан с q простым выражением

$$\varphi = q/C_0, \quad (1)$$

где C_0 — входная емкость ЭМ, которая в нашем случае составляла $4 \cdot 10^{-12}$ F.

На рис. 2, а приведено изменение потенциала φ_m при механическом нагружении образца и его разгрузке. Можно видеть, что при нагружении потенциала φ_m нарастает, а затем при сохранении нагрузки релаксирует. Эта релаксация не определяется прибором, так как постоянная времени ЭМ много больше, и обусловлена процессами внутри образца. Через некоторое время поле спадает практически до нуля. При разгрузке индуцируется потенциал другого знака, который также релаксирует со временем до нуля. Поскольку разгрузка могла производиться практически мгновенно, кривая релаксации при разгрузке использовалась для количественных расчетов.

На рис. 2, б приведены аналогичные измерения индуцированного на измерительном зонде потенциала φ_e при приложении к электродам разности потенциалов, равной 2 V (рис. 1). При подаче разности потенциалов U в момент времени t_1 величина φ_e резко возрастает, а затем постепенно релаксирует и выходит через некоторое время на насыщение (кривая 2). В момент времени t_2 источник напряжения отключался и электроды заземлялись. Релаксация заряда во времени показана на рис. 2, б (кривая 2'). Из рис. 2, а, б видно, что зависимости

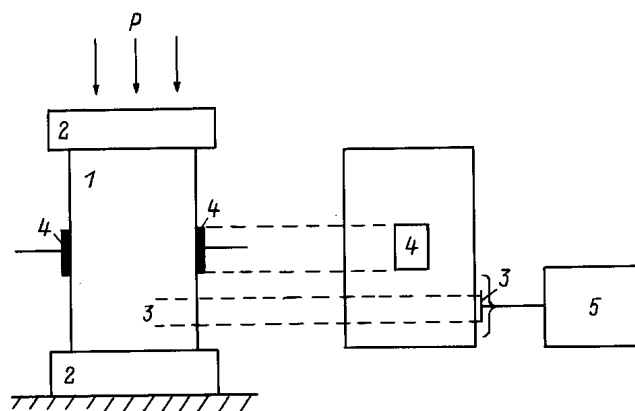


Рис. 1. Схема нагружения и регистрации поляризации бесконтактным методом. 1 — образец, 2 — изолятор, 3 — зонд, 4 — электроды, 5 — электрометр.

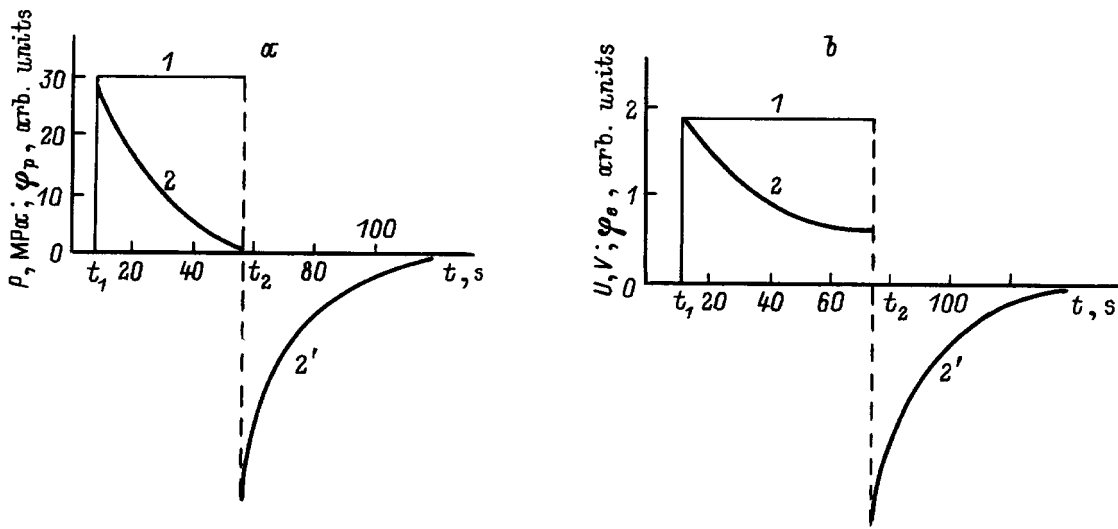


Рис. 2. Изменение во времени механической нагрузки (1) и индуцированного потенциала на зонде электрометра (2) (а), а также электрических потенциалов на зонде электрометра (б).

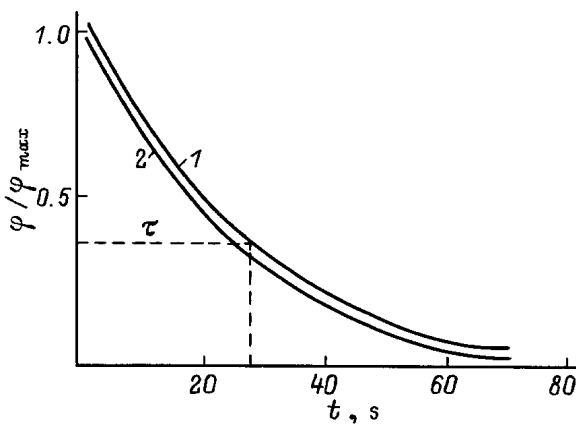


Рис. 3. Релаксация поляризации при механическом нагружении (1) и при поляризации в электрическом поле (2).

релаксации поляризации при механическом нагружении образца и при приложении к нему электрических потенциалов аналогичны. Более того, нетрудно убедиться, что и количественно они практически одинаковы. На рис. 3 эти зависимости приведены в относительных единицах (приведенных к максимальному значению φ_{max}). Видно, что они практически совпадают.

Зависимости релаксации в первом приближении могут быть описаны уравнением кинетики первого порядка

$$\varphi(t) = \varphi_0 [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (2)$$

где φ_0 — значение φ при $t = 0$, $\tau = K^{-1}$, где K — константа скорости процесса релаксации.

В этом случае можно записать термоактивационное уравнение для константы скорости

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (3)$$

где E — энергия активации процесса релаксации, R — газовая постоянная, T — абсолютная температура.

Измеряя $K = \frac{1}{\tau}$ при различных температурах, можно оценить кинетические параметры процесса релаксации, в частности энергию активации E . Величины τ были оценены с помощью измеренных нами кривых релаксации в интервале температур 20–200°C (см. таблицу). [5 В таблице приведены характерные времена релаксации и температуры, при которых они были измерены. На рис. 4 данные таблицы представлены в полулогарифмических координатах, в которых экспериментальные точки укладываются на прямую. Из наклона прямой мы оценили энергию активации процесса релаксации, которая оказалась равной ~ 0.07 eV.

Как видно, энергия активации невелика. Это позволяет предположить, что носителями зарядов, которые участвуют в процессе релаксации, являются слабо закреп-

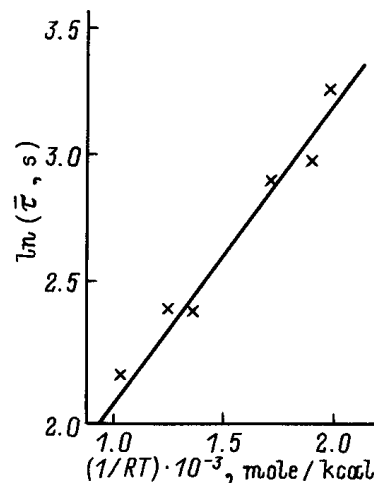


Рис. 4. Температурная зависимость времени релаксации.

Времена релаксации при разных температурах

T°, C	τ_{calc}	τ_{exp}	$\bar{\tau}$
20	35	18	26
60	18.8	12	15.1
100	17.8	11	14.4
140	13.6	7.7	10.3
180	13	8	10.8
200	10.9	7	8.95

Примечание. Величину τ_{calc} получали, считая, что зависимости на рис. 3 подчиняются уравнению кинетики первого порядка (2). τ_{exp} — время, за которое максимальное значение на рис. 3 уменьшается в e раз.

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_{\text{calc}} + \tau_{\text{exp}}}{2}$$

пленные ионы. Эти результаты согласуются с литературными данными. Действительно, электропроводность многих горных пород определяется примесными ионами [6,7] с энергией активации ~ 0.1 eV.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-05-64585).

Список литературы

- [1] В.С. Куксенко, Р.Ш. Килькеев, М.И. Мирошниченко. ДАН СССР **25**, 4, 481 (1981).
- [2] А.Н. Куличенко, Б.И. Смирнов. ФТТ **26**, 11, 3294 (1984).
- [3] В.Н. Николаев, Н.А. Перцев, Б.И. Смирнов. ФТТ **33**, 1, 93 (1991).
- [4] Э.И. Пархоменко. Явления электризации в горных породах. Наука, М. (1968).
- [5] М.Х. Бакиев, Д. Байерли, В.С. Куксенко. ДАН СССР **266**, 6, 1347 (1982).
- [6] Э.И. Пархоменко, А.Т. Бондаренко. Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. Наука, М. (1972). С. 272.
- [7] А.А. Гусейнов, Э.И. Пархоменко. В кн.: Физика горных пород при высоких давлениях. Наука, М. (1991). С. 160–167.