

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. М. Солодуха

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКЕРАМИКИ  
МЕТОДОМ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Учебное пособие

Издательско-полиграфический центр  
Воронежского государственного университета  
2012

Утверждено научно-методическим советом физического факультета

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрические свойства твердых тел (объект исследования твердотельной электроники) — это одна из комплексных проблем науки о конденсированных средах, имеющая огромное практическое значение. Особое место здесь занимают вопросы, связанные с процессами переноса заряда и поляризации в диэлектриках и высокоомных полупроводниках. Однако очень часто возникают трудности в теоретической трактовке электрических свойств данных материалов, т. к. появляются расхождения теории и эксперимента. Кроме того, существует проблема неоднородности. В то время как идеальный диэлектрик, согласно теории Дебая, характеризуется одним временем релаксации, неоспоримым опытным фактом является то, что реальные твердые тела с трудом описываются этой теорией. Наука стоит перед задачей, связанной со сложным строением конденсированных сред, когда большинство материалов, важных для технических целей, просто не поддаются точному описанию на уровне их микроскопических параметров. Для продвижения в этих вопросах необходимо установить общие, или универсальные, характеристики электрических свойств таких сред, изучая их физические, химические, геометрические особенности, а также природу электрической активности, обеспечивающую поляризацию и электропроводность.

Большое внимание в твердотельной электронике уделяется керамическим материалам, особенно на основе сегнетоэлектриков, что объясняется их уникальными свойствами.

Одним из мощных методов изучения электрических свойств керамических материалов является метод импедансной спектроскопии, который широко используется в исследовательских лабораториях во всем мире.

Если на материал действует импульсное напряжение с длительностью импульса  $t$ , то при  $t \ll \tau_M$  вещество можно считать диэлектриком, а в случае обратного неравенства материал можно считать проводящим, или резистивным. Для случая переменного напряжения следует сравнивать  $\tau_M$  и  $1/\omega$ , где  $\omega$  — частота переменного напряжения, т.е. если  $\tau_M \gg 1/\omega$  — это диэлектрик, а при  $\tau_M \ll 1/\omega$  — проводник.

Физический смысл максвелловского времени диэлектрической релаксации можно понять, взяв плоский конденсатор с веществом, имеющим соответствующие  $\varepsilon$  и  $\sigma$ . Тогда, учитывая геометрические параметры образца ( $d$  — толщина,  $S$  — площадь электродов), можно найти электрическую емкость  $C$ , считая его идеальным диэлектриком, и сопротивление постоянному току  $R$ , считая его проводником:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S / d, \quad R = d / \sigma \cdot S.$$

Характерным свойством диэлектриков является крайне малая электропроводность на постоянном токе. Свободные заряды, имеющиеся в любом проводнике, перемещаются под действием электростатического поля и спустя промежуток времени, называемый максвелловским временем релаксации, создают обратное поле, полностью компенсирующее внешнее. Максвелловское время релаксации обратно пропорционально удельной электропроводности материала, поэтому при отсутствии электропроводности, связанной с наличием свободных носителей заряда, характерное время создания компенсирующего поля устремляется к бесконечности. В результате этого внешнее электростатическое поле в диэлектрике оказывается не полностью компенсированным. Оно вызывает поляризацию атомов, молекул или ионов, т.е. формирует совокупный связанный заряд, электрическое поле которого является обратным полем поляризации. При этом происходят из-

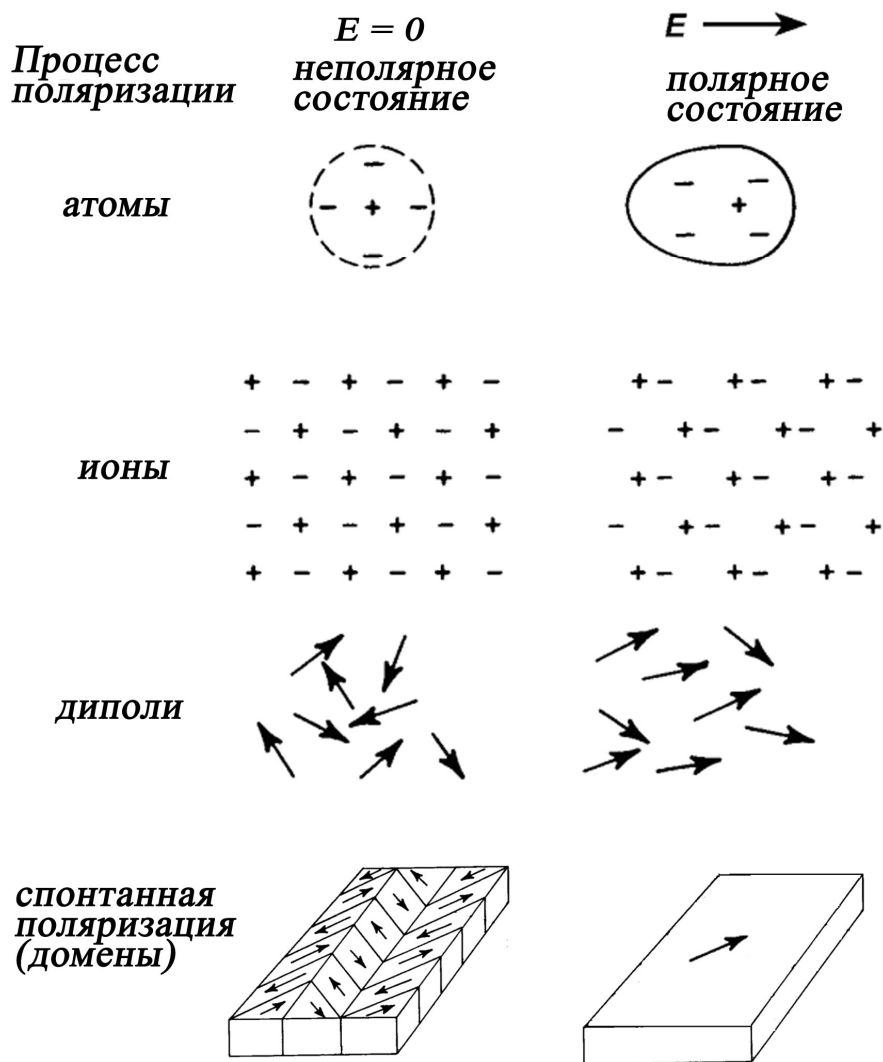


Рис. 1.1. Явления поляризации в кристаллических диэлектриках

менения электронных оболочек атомов, смещение ионов, поворот диполей, движение доменных стенок в сегнетоэлектриках.

На рис. 1.1 показаны основные виды поляризации, которые имеют место в однородных материалах. Для сегнетоэлектрика типа титаната бария представлена картина доменной структуры с  $90^\circ$  и  $180^\circ$  доменными стенками в исходном состоянии (полидоменный образец) и после приложения сильного электрического поля (монодоменный образец). Поляризация, связанная с миграцией заряда в неоднородных материалах, будет рассмотрена ниже.

### 1.1.2. Диэлектрические потери энергии

Для случая переменного напряжения появляются потери энергии, которые принято представлять в виде удельной активной мощности:

$$p = \frac{P}{V} = \omega \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2 = \sigma_a \cdot E^2,$$

где  $P$  — мощность,  $V$  — объем,  $\sigma_a = \omega \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$  — активная составляющая удельной проводимости.

Как следует из последнего выражения, удельная активная мощность  $p$  оказывается пропорциональной произведению  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$ , которое называют коэффициентом диэлектрических потерь  $K$ :

$$K = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

Учитывая выражения для  $K$ , величины  $\sigma$  и  $p$  представим в следующем виде:

$$\sigma = \varepsilon_0 \omega K, \quad p = \varepsilon_0 \omega K E^2.$$

Таким образом, удельная активная мощность потерь  $p$  пропорциональна частоте  $\omega$ , квадрату напряженности поля  $E$  и коэффициенту диэлектрических потерь  $K$ , учитывающему влияние диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь —  $\operatorname{tg} \delta$ . Такая форма представления величины  $p$  удобна для отдельной оценки влияния характеристик поля ( $\omega$ ,  $E$ ) и свойств диэлектрика ( $\varepsilon$ ,  $\operatorname{tg} \delta$ ) на величину удельной активной мощности потерь. Угол  $\delta$ , обычно используемый для диэлектрических материалов, в общем случае есть следствие появления угла сдвига фаз  $\varphi$  между током и напряжением в образце, как показано на рис. 1.2. Активная компонента тока совпадает по фазе с напряжением, а реактивная сдвинута относительно активной на угол  $\pi/2$ .