

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ ПО
ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Атомно-силовой микроскоп

выполнили студенты Б04-852 группы ФЭФМ

Бабичек Илья
Водзяновский Яромир
Груздева Юлия
Демидов Станислав
Денисов Дмитрий

1. Что такое пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный)?

Прямой пьезоэлектрический эффект - явление возникновения электрической поляризации в кристалле под действием механического напряжения

Обратный пьезоэлектрический эффект - возникновение механических напряжений в кристалле под действием электрического поля

2. Чем он отличается от электрострикции?

Электрострикция - это деформация диэлектрических материалов в электрическом поле, пропорциональная квадрату напряженности электрического поля, в изотропных диэлектриках описывается формулой:

$$\Delta V/V = qE^2 \quad (1)$$

где $\Delta V/V$ - относительная объемная деформация, E - напряженность электрического поля, q - постоянная электрострикции, зависящая от сжимаемости, плотности и диэлектрической проницаемости.

Для анизотропных кристаллов электростриксию можно описать зависимостью между 2 тензорами 2-го ранга — тензором квадрата напряженности электрического поля и тензором деформации:

$$r_{ij} = \sum_m \sum_n R_{ijmn} E_m E_n \quad (2)$$

здесь r_{ij} - компонента тензора деформации, E_m, E_n - составляющие электрического поля, R_{ij} - коэффициент электрострикции. Число независимых коэффициентов зависит от симметрии кристаллов.

- Электрострикция обусловлена поляризацией диэлектриков в электрическом поле, то есть смещением под действием внешнего электрического поля атомов, несущих на себе электрические заряды (ионы, электрические диполи), или изменением ориентации диполей. Она наблюдается у всех диэлектриков.
- В отличие от электрострикции прямой пьезоэлектрический эффект наблюдается только в кристаллах (твердых телах с трехмерно-периодической укладкой) без центра симметрии. Это объясняется тем, что при деформации кристалла центр симметрии сохраняется, а при наличии центра симметрии не может быть поляризации.
- Эффект электрострикции является квадратичным (четным) ф-ла (1), в то время как обратный пьезоэлектрический эффект — линейным (нечетным). Вследствие этого под действием переменного электрического поля частотой ω в случае электрострикции диэлектрик колеблется с удвоенной частотой 2ω , а в случае обратного пьезоэлектрического эффекта диэлектрик будет колебаться с той же частотой.
- В случае электрострикции направление деформации тела не зависит от направления электрического поля. В случае же пьезоэлектрического эффекта деформация прямо пропорциональна напряженности поля, причем с изменением направления поля на противоположное знак деформации меняется.
- В отличие от пьезоэффекта электрострикция является необратимым эффектом.

3. Запишите уравнение пьезоэлектрического эффекта. Опишите каждый тензор в уравнении. Запишите границы применимости вашего уравнения.

Электрическая поляризация $P = D - \varepsilon_0 E$ связана с поверхностным зарядом, в первом приближении увеличивается линейно относительно механического напряжения σ :

$$D = P + \varepsilon_0 E = d\sigma \quad (3)$$

где D и E - векторы индукции и напряженности электрического поля, а механическое напряжение σ и деформация ε - тензоры второго ранга. Пьезоэлектрический коэффициент d - тензор третьего ранга. В компонентном виде получаем соотношение для прямого пьезоэффекта:

$$D = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Индексы 1,2,3 относятся к кристаллическим параметрам и их можно совместить с координатными направлениями x, y, z при соответствующей ориентации.

Обратный пьезоэлектрический эффект дает соотношение между напряженностью электрического поля E и механической деформацией ε :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Коэффициенты d_{ij} тождественны прямому пьезоэлектрическому эффекту.

4. **В каких средах нельзя наблюдать пьезоэлектрический эффект? Покажите это математически на основе выписанного ранее уравнения. (Пример: кристаллический кварц SiO_2 применяют в радиотехнике в качестве резонатора с высокой добротностью, т.е. он точно обладает обратным пьезоэффектом, а кварцевое стекло с идентичным составом не обладает - почему?) Сделайте вывод.**

В зависимости от кристаллической структуры, некоторые пьезоэлектрические коэффициенты станут нулевыми или их можно приравнять к друг другу. Фактически вид тензора определяется кристаллическим классом, к которому материал принадлежит. Кристаллы обладающие центральной симметрией (как кремний) или изотропные материалы не проявляют пьезоэлектрический эффект.

У кристаллов вдоль направлений симметрии зануляются пьезоэлектрические компоненты, это накладывает ограничения на направления возможной поляризации. Соответственно, если кристалл будет обладать центральной симметрией будет иметь нулевой пьезоэлектрический тензор и не будет обладать пьезоэффектом.

Кварцевое стекло - аморфное вещество, у него нельзя выделить четкое направление поляризации ввиду отсутствия кристаллической структуры в отличие от кристаллического кварца.

5. **Что такое керамика (как структура твердого тела)? Каким принципиальным свойством должно обладать вещество, чтобы из него можно было изготовить пьезокерамику? Почему в пьезосканерах используют пьезокерамику, а не кристаллический пьезоэлектрик?**

Керамика - неметаллический поликристаллический (агрегат кристаллов какого-либо вещества) материал, обычно получаемый спеканием порошков.

Пьезокерамика - искусственный материал, обладающий пьезоэлектрическими и сегнетоэлектрическими свойствами, имеющий поликристаллическую структуру. По своей сути пьезокерамика это спрессованные зерна кристаллов (минимальный объем монокристалла, окруженный высокодефектными границами), которые *должны обладать пьезоэлектрическим свойством*. По химическому составу пьезокерамика сложный оксид. Большинство составов пьезокерамики основано на химических соединениях с кристаллической структурой типа перовскита с формулой ABO_3 , например $BaTiO_3$.

Пьезокерамике можно придать любую форму, в частности, в сканере АСМ она имеет вид трубок, такую форму невозможно придать монокристаллу. Однако пьезокерамика обладает рядом недостатков, таких как нелинейность, гистерезис, ползучесть, старение и температурный дрейф.