

Лекция 13. Пьезоэлектрики

Пьезоэлектрический эффект и электрострикция.

Пьезоэлектриками называются вещества, в которых при приложении механических напряжений возникает электрическая поляризация даже в отсутствие электрического поля. Этот эффект называется прямым пьезоэффектом. Его причиной является упругое смещение электрических зарядов под действием внешних механических сил. Наряду с прямым пьезоэффектом существует обратный пьезоэффект, заключающийся в возникновении механических деформаций под действием приложенного к пьезоэлектрику электрического поля. Первые исследования пьезоэффекта были выполнены в 1880 г. Ж. и П. Кюри на кристаллах кварца (SiO_2).

Пьезоэффект является одним из проявлений различных электромеханических эффектов, связанных с взаимодействием механических и электрических величин в диэлектрических материалах. Так, при помещении любого диэлектрика в электрическое поле свободный кристалл деформируется, а в зажатом кристалле возникают деформации. Напомним, что в соответствии с законом Гука тензор упругих деформаций u_{ij} связан с создающим их тензором упругих напряжений σ_{kl} посредством тензора упругих податливостей S_{ijkl} :

$$u_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}. \quad (2.1)$$

Физической причиной электромеханических эффектов являются микроскопические смещения электрических зарядов в приложенном электрическом поле. Характер зависимости деформации (напряжения) от поля определяется симметрией кристаллической структуры. Напомним, что симметрией кристаллов называется свойство кристаллов совмещаться сами с собой при поворотах, отражениях и параллельных переносах.

Во всех диэлектриках (и центросимметричных и без центра симметрии) в приложенном электрическом поле возникает эффект электрострикции - деформация, пропорциональная квадратичной степени поля

$$u_{ij} = R_{ijkl} E_k E_l, \quad (2.2)$$

где R_{ijkl} - тензор электрострикции.

Этот квадратичный эффект заметно проявляется лишь в сильных электрических полях (рис. 2.1) и обусловлен смещением электрических зарядов в поле.

Только в твердых диэлектриках, не имеющих центра симметрии, наблюдаются прямой и обратный пьезоэффекты. Количественной характеристикой прямого и обратного пьезоэффекта в кристаллах является совокупность пьезоэлектрических констант (пьезомодулей), представляющих коэффициенты пропорциональности между электрическими и механическими параметрами.

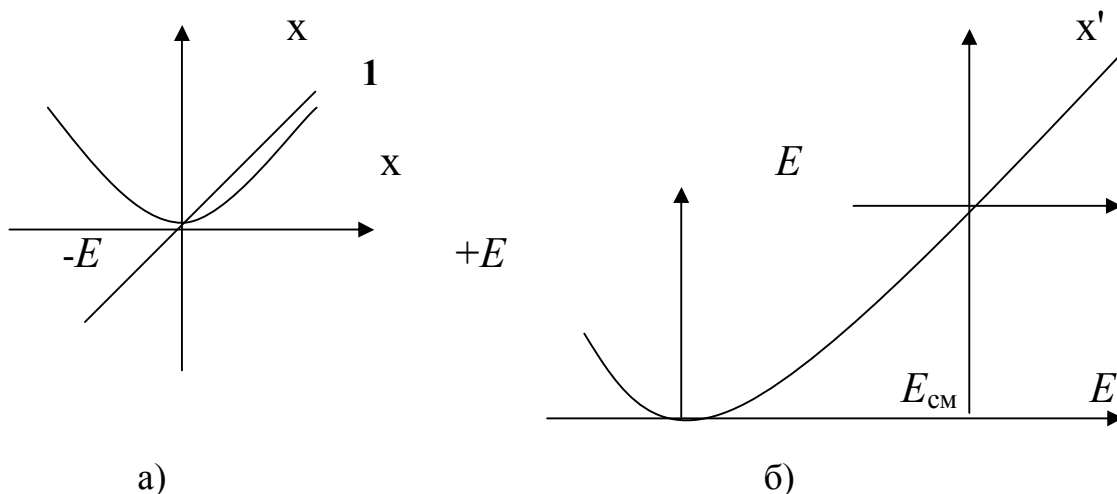


Рис. 2.1. Зависимость деформаций от напряженности электрического поля: а) традиционное сравнение пьезоэффекта (1) и электрострикции (2); б) пьезоэффект - частный случай электрострикции в поле E_{cm} .

Прямой пьезоэффект можно описать зависимостью возникающей электрической поляризации P_i от приложенных механических напряжений

$$P_i = d_{imn} \sigma_{mn}, \quad (2.3)$$

где d_{imn} - тензор третьего ранга для пьезомодулей.

Выражение (2.3) можно представить и через функциональную зависимость от деформаций u , используя закон Гука в виде (2.1)

$$P = l u, \quad (2.4)$$

где $l = S d$.

В выражении (2.4) и в ряде последующих выражений для упрощения опущены индексы.

Обратный пьезоэффект также описывается линейной функцией зависимости наведенной деформации от приложенного электрического поля:

$$u_{kl} = d_{kli} E_i. \quad (2.5)$$

Пьезоконстанты различаются по величине и количеству независимых компонент для кристаллов различных типов.

При прямом пьезоэффекте макроскопический электрический момент (поляризованность) возникает за счет смещения заряженных частиц (ионы, молекулы). В диэлектрике с центром симметрии такое смещение не приводит к возникновению поляризованного состояния, поскольку происходит компенсация электрических моментов положительных и отрицательных частиц вследствие их симметричности относительно центра. Поэтому электрострикция не имеет обратного эффекта.

Модель прямого пьезоэффекта в кварце SiO_2 , имеющего тригональную ячейку, предложенная Резом и Поплавко, представлена на рис.2.2. В исходном состоянии ячейка электронейтральна и не имеет центра симметрии. При приложении внешнего механического напряжения вдоль оси a_1 , ячейка растянута вдоль оси a_2 . Этому растяжению соответствует относительная деформация $u = \Delta a/a$, где a – параметр элементарной ячейки.

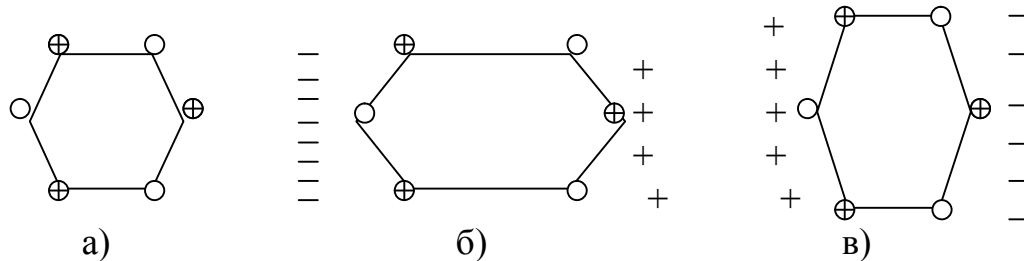


Рис. 2.2. Модель прямого пьезоэлектрического эффекта в тригональной ячейке: а) при отсутствии деформации (поле не индуцируется); б) растяжение ячейки в горизонтальном направлении (индуцируется электрическое поле); в) сжатие ячейки в горизонтальном направлении (полярность пьезоэффекта изменяется)

Поскольку пьезоэффект в кристаллах анизотропен, то для указанной симметрии кварца поляризация возникает только вдоль оси a_2 , а вдоль оси a_1 поляризация отсутствует. Следовательно, вдоль оси a_2 возникает электрический момент P , который с учетом преобразования

$$\sigma = C\epsilon, \quad (2.6)$$

где C_{ijkl} - тензор четвертого ранга для упругих жесткостей, имеет вид

$$P = d\sigma \quad (2.7)$$

т.е. удовлетворяет выше приведенному выражению для пьезоэффекта.

Анизотропия пьезоэлектрических свойств в кристаллах описывается тензором третьего ранга для пьезомодулей. Максимальное число компонент не может превосходить 18, так как тензор деформации для твердого тела характеризуется шестью компонентами, а вектор электрического поля тремя компонентами. В зависимости от набора элементов симметрии для различных классов кристаллов в матрице пьезомодулей сохраняются лишь некоторые компоненты, а остальные обращаются в нуль. Общий вид матрицы для пьезомодулей имеет вид

$$d_{ij} = \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{vmatrix} \quad (2.8)$$

Периодические упругие деформации, возникающие в твердом теле под внешним воздействием, является причиной распространения в них акустических (упругих) волн. Всякая гармоническая упругая волна характеризуется амплитудой A колебательного движения частиц среды и его направлением (поляризацией), колебательной скоростью частиц V . Такая плоская волна в простейшем случае описывается уравнением (2.10):

$$A = A_0 \sin(\omega t - qr), \quad (2.9)$$

где $q = 2\pi/\lambda$ - волновой вектор.

В однородной изотропной твердой среде могут распространяться упругие волны только двух типов: продольные и сдвиговые. В продольных волнах движение частиц параллельно вектору распространения волны, а в сдвиговых волнах движение частиц перпендикулярно направлению распространения волны, на границе твердого полупространства с вакуумом, газом, жидкостью или с другим полупространством могут распространяться акустические поверхностные волны.

В анизотропных средах (кристаллах) свойства акустических волн зависят от типа кристалла и направления распространения относительно кристаллографических осей. В общем случае в кристалле по любому направлению могут распространяться три волны с тремя различными скоростями и со взаимно-ортогональными векторами поляризации: одна продольная и две поперечных (сдвиговых) волны.

Обычно в системах передачи и обработки какой либо информации осуществляется модуляция (амплитудная, фазовая или частотная) гармонических электромагнитных или акустических колебаний. Такая модулированная форма колебаний, отображающая информацию, называется сигналом. Обратный процесс извлечения информации из сигнала называется демодуляцией.

Пьезоэлектрические материалы

К пьезоэлектрическим материалам относятся вещества, обладающие достаточно сильным пьезоэффектом, в виде монокристаллов, керамик, пленок, композитов. Если ранее в основном использовались естественные минералы (кварц, турмалин, цинковая обманка и др.), то в последующем они были заменены на разнообразные синтезированные материалы (например, ниобат лития, триборат лития, пьезокерамики, пьезополимеры и т.д.).

Пьезоэлектрические материалы получают различными способами. Монокристаллы и монокристаллические пленки выращиваются из газовой

фазы, из растворов и расплавов. Выбор метода выращивания определяется областью устойчивости вещества, температурой и типом фазового перехода, химическими свойствами. Большие совершенные по структуре кристаллы получают, применяя «затравки» в виде мелких кристалликов и создавая оптимальное перенасыщение раствора или расплава. Для перекристаллизации мелких кристалликов в крупные монокристаллы применяется способ перекристаллизации путем выдерживания поликристалла длительное время при высокой температуре. Монодоменизация сегнетоэлектрических материалов достигается путем их охлаждения от точки фазового перехода до комнатной температуры в сильном электрическом поле, достаточном для переполяризации доменов.

Керамики получают высокотемпературным синтезом из смеси оксидных соединений типа титаната-цирконата свинца. После синтеза сегнетоэлектрическая керамика не обладает пьезоэффектом и ее поляризуют, нагревая в сильном электрическом поле.

К пьезополимерам относятся поливинилиденфторид (ПВДФ) и сополимеры на его основе. Полимерные преобразователи изготавливаются в основном в виде текстурированных пленок, ориентированных вытяжением или улетучиванием растворителя. Материалы на основе ПВДФ выпускаются в виде пленок толщиной от 10 мкм до 1 мм и более, металлизированных и поляризованных по толщине.

Пьезоэлектрические композитные материалы (пьезокомпозиты) созданы путем пропитки пористого каркаса из пьезокерамики полимером. Другим видом пьезокомпозитов являются частицы пьезокерамики в виде порошинок или тонких стерженьков, распределенные в полимерной матрице (эпоксидной или поликсилосановой).

В качестве излучателей и приемников акустических сигналов в воздухе и жидкой среде в диапазоне частот 1-200 кГц чаще всего используются монокристаллы тетрабората лития, сульфата лития, сегнетопьезополупроводники сульфоиодида сурьмы и особенно различные виды пьезокерамик и полимерных материалов. Для излучения и приема ультразвуковых колебаний в диапазоне 1-200 МГц наиболее широко применяются диэлектрические монокристаллы ниобата и танталата лития, кварца, германата свинца, полупроводниковые монокристаллы сульфида кадмия, оксида цинка, арсенида галия. Их основные характеристики приведены в таблице 2.1. На частотах выше 100-200 МГц обычно применяют тонкие пленки пьезополупроводников (нитрит алюминия или оксид цинка).