

13 Спрегнати ефекти в кристалите

1. Топлинно разширение

Възникване на механична деформация при изменение на температурата.

Обратим процес. Описва се от равновесната термодинамика.

$$S_{ij} = \alpha_{ij} \cdot \Delta T \quad (1)$$

S_{ij} – симетричен тензор на механична деформация,
 α_{ij} – коефициент на топлинно разширение на кристала.

За разлика от S_{ij} , където деформацията е предизвикана от външни сили, симетрията на физичното свойство, описано с тензора на топлинно разширение е свързано със симетрията на кристала.

α_{ij} се представя с главните си оси:

$$S_1 = \alpha_1 \cdot \Delta T; \quad S_2 = \alpha_2 \cdot \Delta T; \quad S_3 = \alpha_3 \cdot \Delta T \quad (2)$$

Това са разширенията на кристала по трите главни оси.

В общия случай температурната сфера в кристала се превръща в елипсоид с оси, пропорционални на $(1 + \alpha_i \cdot \Delta T)$.

α_i – главни коефициенти на топлинно разширение

$\alpha_i > 0$ (обикновено се наблюдава) → Характеристичната повърхност на α_{ij} е елипсоид.

$\alpha_i < 0$ (калцит, сребърен йодит и др.) → Характеристичната повърхност на α_{ij} е хиперболоид.

За кубичната система: сфера → сфера

2. Пиезокалоричен ефект

Под действието на механично напрежение на кристала се изменя ентропията му.

Обратен ефект на топлинното разширение.

$$dS = \alpha_{ij}^* \cdot dT_{ij} \quad (3)$$

От термодинамични съображения се доказва, че $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}^*$.

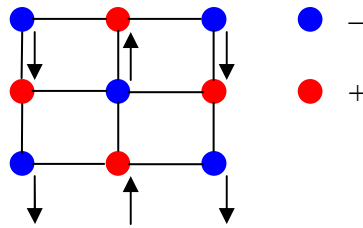
3. Пироелектричен ефект

3.1. Пироелектрични кристали

Йонни кристали, които имат макроскопична диелектрична поляризация, без да е приложено външно електрично поле (ЕП) или спонтанна поляризация. Такива са и някои молекулни кристали съставени от молекули с постоянен диполен момент, ориентиран по определен начин в КР.

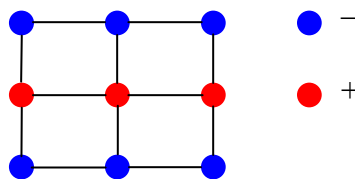
Йонни кристали:

- Центросиметрично разположение на йоните - без постоянна електрична поляризация \vec{P} :



Общият диполен момент е равен на нула, тъй като диполните моменти на отделните двойки се компенсират.

- Нецентросиметрично разположение на йоните - с постоянна поляризация \vec{P} :



Диполните моменти на отделните двойки имат еднаква посока и се сумират. Общият диполен момент $|\vec{P}| \neq 0$. Макроскопичната поляризация е различна от нула.

Пироелектрична ос – оста, по която е насочена спонтанната поляризация.

При обикновените пироелектрици, посоката на пироелектричната ос и големината на спонтанната поляризация не се изменят под действие на външно ЕП.

За да бъде йонният кристал пироелектрик трябва да изпълнява следните условия:

- Да не притежава център на симетрия. Съществуват такива 21 нецентросиметрични класа.
- Да притежава полярна ос на симетрия или въобще да няма ос на симетрия.

Само 10 нецентросиметрични класа са пироелектрични:

2, 3, 4, 6, mm2, 3m, 4mm, 6mm, m, 1.

Пироелектричната ос:

- за едноосните кристали - съвпада с полярната ос;
- за клас m – лежи в равнината на симетрия m;
- за клас 1 – без ограничения.

3.2. Електрети

Термоелектрети – при охлаждане от висока температура до стайна във външно постоянно ЕП възниква поляризация \vec{P} .

Фотоелектрети – при осветяване във външно постоянно ЕП възниква поляризация \vec{P}

Тези състояния са нестабилни.

Често пироелектричните кристали се наричат кристални електрети.

3.3. Първичен пироелектричен ефект

При изменение на температурата ΔT се изменя постоянната електрична поляризация и с нея плътността на заряда върху повърхност перпендикулярна на пирооптичната ос.

$$\Delta P_i^s = p_i \cdot \Delta T \quad (4)$$

\vec{p}_i – пироелектричен вектор с компоненти – пироелектрични коефициенти.

Изменението на температурата става бързо и изменението на повърхностния заряд σ не се влияе от проводимостта.

σ – повърхностният заряд се измерва трудно поради неутрализацията, в следствие на проводимостта на въздуха или кристала.

3.4. Вторичен пироелектричен ефект

При загряване (охлаждане) кристалът се деформира ((разширява или свива) – термично разширение) и се изменя поляризацията.

$$T \rightarrow S_{ij} \rightarrow P_k$$

Пример за пироелектричен кристал е турмалинът (тригонална симетрия):

$$p_i = 4 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2 \cdot \text{deg}$$
$$(\varepsilon_{ij} = 7.1 \Rightarrow P_i = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ij} \cdot E_j, \text{ т.е. трябва } E = 740 \text{ V/cm})$$

4. Електрокалоричен ефект - обратен на пироелектричния.

Изменение на температурата на пироелектричен кристал при изменение на поляризацията му под влияние на външно ЕП.

При пироелектриците

$$dS = p_i^* \cdot dE_i, \quad p_i = p_i^* \quad (5)$$

p_i^* – вектор на електрокалоричния ефект

$$\begin{matrix} dS \leftarrow \Delta E_i \\ (T) \quad (\Delta P) \end{matrix}$$

Твърде слаб ефект $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$ в поле $E = 300 \text{ V/cm}$.

5. Пиезоелектричен ефект

$$\begin{matrix} T_{ij} \rightarrow P_i \\ (S_{ij}) \end{matrix}$$

При прилагане на механично напрежение към нецентросиметричен йонен кристал ще възникне деформация, която ще измени диелектричната му поляризация.

$$P_i = d_{ikl} \cdot T_{kl} \quad (6)$$

d_{ikl} – тензор от III ранг на пиезоелектричните модули – 27 броя.
Симетричен спрямо последните два индекса k и l .

Матрично представяне на d_{ikl} .

Вместо в тензорна форма връзката се дава чрез матрици.

Матрица на вектора на поляризация:

$$P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix}$$

Матрица на тензора на напрежение: $T = (T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6)$

Заместваме $kl \rightarrow p$ индексите:

$$\begin{cases} d_{ip} = d_{ikl}, & k = l \\ d_{ip} = 2d_{ikl}, & k \neq l \end{cases}$$

$$P_i = d_{ip} T_p, \quad i = 1, 2, 3; \quad p = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

	T_1	T_2	T_6
P_1	d_{11}	d_{12}		d_{16}
P_2	d_{21}	d_{22}		d_{26}
P_3	d_{31}	d_{32}		d_{36}

Таблицата дава матрицата на тензора на пиезоелектричните модули.

6. Обратен пиезоелектричен ефект

При прилагане на електрично поле върху нецентросиметричен кристал ще възникне механична деформация.

Обратен ефект на правия пиезоэффект.

$$S_{ij} = d_{ijk}^* \cdot E_k \tag{7}$$

d_{ijk}^* – (симетричен тензор III ранг) модул на обратния пиезоелектричен ефект.

Матрично представяне:

$$S_p = d_{pk}^* \cdot E_k, \quad p = 1 \div 6; \quad k = 1, 2, 3$$

$$d_{pk}^* = d_{kp}$$

	E_1	E_2	E_3
S_1	d_{11}^*	d_{12}^*	d_{13}^*
S_2			
S_3			
S_4			
S_5			
S_6	d_{61}^*	d_{62}^*	d_{63}^*

Правият и обратният пиезоелектрични ефекти се наблюдават при йонните кристали на всички 21 нецентросиметрични класа.