

16. НЯКОИ НЕРАВНОВЕСНИ И НЕЛИНЕЙНИ ЯВЛЕНИЯ В КРИСТАЛИТЕ – ТОПЛОПРОВОДНОСТ, ЕЛЕКТРОПРОВОДИМОСТ, ЕЛЕКТРОСТРИКЦИЯ. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИ ЕФЕКТИ

1. Нелинейни или квадратични ефекти

1.1. Електрострикция

При голяма интензивност на полевите величини се наблюдават нелинейни (квадратични) ефекти. За голямо електрично поле (ЕП), обратният пиезоелектричен ефект е:

$$(1) \quad S_{ij} = d_{ijk}^* E_k + r_{ijkl} E_k E_l$$

$d_{ijk}^* E_k$ – линеен обратен пиезоелектричен ефект

$r_{ijkl} E_k E_l$ – електрострикционен член

r_{ijkl} – тензор на електрострикцията, броят на коефициентите е по-малък от 81, поради симетрията на S_{ij} и на кристала.

Електрострикция - Възникването на деформация в йонни кристали, с център на симетрия, пропорционална на квадрата на интензитета на електричното поле.

Аналогичен ефект на обратния пиезоелектричен ефект.

Възниква и при centrosиметрични йонни кристали. Под действие на ЕП двете подрешетки на положителни и отрицателни йони се преместват една спрямо друга, т.е. възниква поляризация. Това създава механична деформация. Деформацията не зависи от посоката и знака на \vec{E} .

Много слаб ефект даже при полета близки до $E_{пробивно}$ в сравнение с обратния пиезоелектричен ефект.

Аналогичен ефект е магнестрикцията - при прилагането на силни магнитни полета (МП). Силно е при някои феро и феримагнитни кристали.

Не се наблюдава ефект обратен на електрострикцията, т.е. под действие на механично напрежение не възниква поляризация в centrosиметрични йонни кристали.

2. Неравновесни процеси

Тези процеси са необратими. Типични примери са преносните явления в кристалите. Описвани с тензор от II ранг са топлопроводност и електропроводност.

2.1. Теплопроводност

Характеризира се от два вектора:

- $gradT$ – градиент на температурата,
- \vec{q} – плътност на топлинния поток с компоненти:
 q_i – количеството топлина, протичаща за единица време през единица площ, перпендикулярна на съответната ос X_i .

В изотропни среди $gradT$ и \vec{q} съвпадат по направление:

$$q = -\alpha \cdot gradT = -\alpha \frac{dT}{dr}$$

$gradT$ има посоката на нарастване на T .

α – положителен скалар, коефициент на топлопроводност.

В анизотропни среди (кристали):

$$q_i = -\alpha_{ik} \cdot \frac{dT}{dx_k}$$

Прилагаме температурно поле: $gradT = 1$.

Получават се следните топлинни потоци: $q_1 = -x_{1k}, q_2 = -x_{2k}, q_3 = -x_{3k}$

Всяка компонента q_i зависи от всички k компоненти на $gradT$. Наблюдава се освен надлъжна компонента по $gradT$ и две напречни компоненти.

α_{ik} – тензор от II ранг, тензор на топлопроводност с компоненти – коефициенти на топлопроводност

$\alpha_{ik} = \alpha_{ki}$ – симетричен тензор

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 > 0$ – главните стойности на тензора винаги са по-големи от нула, следователно характеристикната му повърхност е елипсоид. Формата и ориентацията му се съгласуват със симетрията на кристала (съгласно Таблица 1 от 14 въпрос).

2.2. Електропроводимост

Феноменологически напълно аналогично на топлопроводността:

Два вектора:

➤ $grad\varphi$ – градиент на електричния потенциал или

$\vec{E} = -grad\varphi$ – интензитет на ЕП

➤ \vec{j} – плътност на тока с компоненти:

j_k – количеството заряд, протичащо за единица време през единица площ, перпендикулярно на ос X_k

В изотропни среди \vec{j} и \vec{E} имат еднакви направления.

$$j_k = \sigma \cdot E_k$$

σ – положителен скалар, коефициент на електропроводимост.

В кристали: $j_i = -\sigma_{ik} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial x_k} = \sigma_{ik} \cdot E_k$

σ_{ik} – тензор на електропроводимост, тензор от II ранг

$\sigma_{ik} = \sigma_{ki}$ – симетричен тензор

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 > 0$ – главните стойности на тензора винаги са положителни, следователно характеристикната повърхност е елипсоид. Формата и ориентацията му се съгласуват със симетрията на кристала съгласно Таблица 1 (14 въпрос).

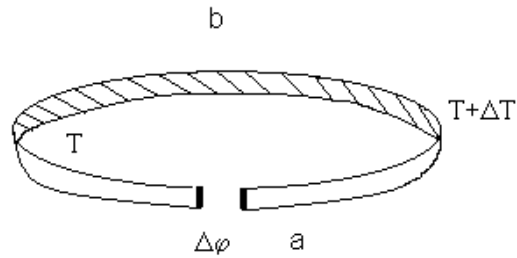
3. Взаимодействие между топлопроводност и електропроводимост

Двата процеса могат да се извършват едновременно във всяко тяло и си взаимодействат помежду си. В резултат възникват т. нар. термоелектрични явления.

3.1. Термоелектрични явления в изотропни проводници

3.1.1. Термодинамика на необратими процеси

Принцип на Онзагер. Приложим към всички преносни явления.



Разглеждаме следната верига: Свързани са два различни проводника a и b . Контактите им са при различни температури. Включен е кондензатор с разлика в потенциалите $\Delta\varphi$. Следователно, във веригата едновременно протичат пренос на електричество и пренос на топлина, които взаимно си влияят и възникват термоелектрични явления.

В изотропен материал протичат:

$$\text{Електричен ток: } j = -\text{grad}\varphi \cdot L_1 = -\sigma \text{ grad}\varphi, \quad j = \sigma \cdot E$$

$$\text{Топлинен поток: } q = -\frac{1}{T} \text{ grad}T \cdot L_2 = -\alpha \left(\text{grad}T \cdot \frac{1}{T} \right) \cdot T, \quad q = -\alpha \cdot \text{grad}T$$

Означаваме: ПОТОК j : $j_1 = j$ поток заряди или плътност на тока
 $j_2 = q$ плътност на топлинния поток

СИЛА x : $x_1 = -\text{grad}\varphi$

$$x_2 = -\frac{1}{T} \text{ grad}T - \text{специфична причина за въвеждането}$$

В общия случай: когато едновременно става пренос на заряди и на топлина се предполага линейна връзка:

$$j_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2$$

$$j_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2$$

Всеки поток е свързан с две сили.

При правилен избор на потоците и силите според принципа на Онзагер се получава:

$$\boxed{L_{12} = L_{21}}$$

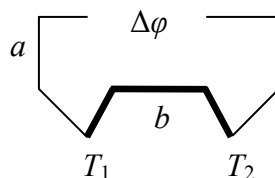
Принципът на Онзагер е аналогичен на II принцип на ТД на равновесни процеси.

Ако броят потоци и силите е повече от две, то

$$j_i = L_{ij}X_j, \quad (i,j=1,2,3,\dots,n)$$

$$\boxed{L_{ij} = L_{ji}} - \text{принцип на Онзагер}$$

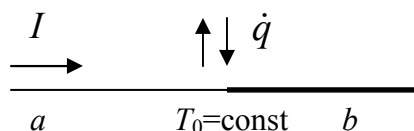
3.1.2. Ефект на Зеебек - термоЕДС на термодвойка



Ако между двете спойки на термодвойка, съставена от два различни метала a и b има разлика в температурите ΔT , то възниква термоЕДС - $\Delta\varphi$.

$d\varphi/dT$ – термоелектрическа мощност на контакта – разлика в потенциалите за единица разлика в температурите при отсъствие на ток.

3.1.3. Ефект на Пелтие



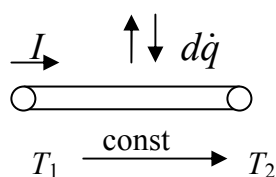
Скоростта на поглъщане на топлина в контакта при протичане на ток I от метал a към метал b е:

$$\frac{dq}{dt} = \dot{q}_{ab} = \Pi_{ab} \cdot I$$

Π_{ab} – коефициент на Пелтие, зависещ от температурата и проводниците a и b .

Ако по проводниците a и b тече ток, за да се поддържа постоянна температура в контакта (спойката) е нужно непрекъснато да се подава или отнема от него топлина q .

3.1.4. Ефект на Томсон



През неравномерно нагрят проводник с постоянно напречно сечение от еднороден материал се пропуска ток I . За да се запази разпределението на температурата непроменено, трябва непрекъснато да се подава топлина. Скоростта на притока топлина (количеството топлина, което се подава за единица време), необходима за поддържане на стационарното разпределение на температурата в проводника, който има градиент на температурата в направление на тока е:

$$d\dot{q} = \tau \cdot I \cdot dT$$

τ - коефициент на Томсон

3.1.5. Съотношение на Томсон

Първо: следва от I закона на термодинамиката:

$$dQ = dU + \delta A$$

$$- \Pi_{ab} + (\tau_b - \tau_a) \Delta T = \Delta \phi$$

Второ: следва от принципа за Онзагер (в термодинамиката на необратимите (неравновесни) процеси заема такова място като II принцип на термодинамиката)

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = - \frac{\Pi_{ab}}{T}$$

От тези съотношения се получава:

$$\Pi_{ab} = -T \frac{d\phi}{dT} \text{ – за топлината (коефициент) на Пелтие}$$

$$(\tau_b - \tau_a) = T \frac{d^2 \phi}{dT^2} \text{ – за топлината (коефициент) на Томсон}$$

3.2. Термоелектрически ефекти в кристали

3.2.1. Ефект на Пелтие

$$\dot{q}_{ab} = -\Delta_n(j_i \Pi_{ik}) = -\frac{\partial}{\partial X_k}(j_i \Pi_{ik})$$

Δ_n - скок на нормалните компоненти,

$\Pi_{ik} = T \frac{\alpha_{ik}}{l}$ – матрица (тензор) на Пелтие,

$\frac{\alpha_{ik}}{l}$ – абсолютна термоелектрична мощност на проводника в дадена точка при дадена температура.

α_{ik} – матрица, характеризираща термоелектрическите свойства на кристала.

В общия случай несиметрична.

При наличие на симетрия в кристала компонентите на α_{ik} намаляват.

$$\dot{q} = -T \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{j_i}{l} \cdot \alpha_{ik} \right) = -\frac{\partial}{\partial X_k} \left(j_i T \cdot \frac{\alpha_{ik}}{l} \right)$$

$$\boxed{\dot{q} = -\frac{\partial}{\partial X_k}(j_i \Pi_{ik})} \text{ – ефект на Пелтие}$$

3.2.2. Ефект на Томсон

$$\boxed{\dot{q} = -j_i \tau_{ik} \frac{\partial T}{\partial X_k}}$$

$$\tau_{ik} = -\frac{T}{l} \left(\frac{\partial \alpha_{ik}}{\partial T} \right)_X \text{ – тензор на топлината на Томсон}$$

В общия случай се наблюдават надлъжни и напречни ефекти на Пелтие и Томсон.