

ИЗУЧАВАНЕ НА МЕТОДА НА ТЕРМОСТИМУЛИРАНАТА ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ (МЕТОД НА ТЕРМОДЕПОЛЯРИЗАЦИОННИЯ ТОК)

Методът на термостимулираната деполяризация е един от най-информативните методи при изучаване на поляризацията и натрупване на заряд в диелектрици. Тоя позволява да се определи сумарният заряд, натрупван в диелектрика и да се пресметнат основните параметри на релаксационните процеси, характеризиращи стабилността на натрупания заряд, такива като енергия на активация на носителите, време на релаксация, сечение на захват и други.

Същността на метода се състои в следното (**Фиг. 1**): поляризираният или зареден диелектрик се поставя между два електрода в термокамера, където може да се осъществи нагряване на образеца. Електродите се свързват с електрометър.

Фиг. 1

При нагряване на образеца във външната верига протича ток на термостимулираната деполяризация. Най-разпространените методи за пресмятане на параметрите на захвата предполагат постоянна скорост на нагряване в процеса на деполяризация (**Фиг. 2**).

Фиг. 2

$$T = T_0 + bt, \quad (1)$$

където T_0 - началната температура (в момент $t = 0$) и b - скорост на загреване - $b = \frac{dT}{dt}$.

Могат да бъдат построени зависимостите $I = I(t)$ или $I = I(T)$ - **Фиг. 3**.

Фиг. 3

За анализа на кривите на термостимулираната деполяризация (ТСД) са предложени различни методи, в зависимост от направените предложения за кинетиката на рекомбинационните процеси.

Независимо от разнообразните форми за анализа на кривите на ТСД, теоретичната зависимост на тока на ТСД има почти един и същи вид:

$$j = A \exp \left\{ -\frac{E}{kT} - B \int_{\tau_0}^{\tau} \exp \left(-\frac{E}{kT} dt \right) \right\}. \quad (2)$$

За различните типове кинетика A B могат да имат различен вид. Например за мономолекулярната рекомбинация и бавен повърхностен захват:

$$A = \frac{(n_{t_0} q \delta)^2 \mu \tau}{2 \varepsilon \tau_0 L} \quad \text{и} \quad B = \frac{2}{b \tau_0}, \quad (3)$$

където:

n_{t_0} - начална плътност на захванатите заряди;

δ - дълбочина на проникване на заряда;

μ - подвижност на носителите на заряда;

τ - времето на релаксация на заряда (времето на живот на свободните заряди)

$$\left[\tau = \tau_0 \exp \frac{E}{kT} \right]$$

b - скорост на загряване на образеца;

$\tau_0 = \frac{1}{N_c v S_t}$ - величина, обратна на вероятността за рекомбинация;

N_c - ефективна плътност на състоянията в зоната на проводимост;

v - топлинната скорост на свободните носители на заряда;

S_t - сечението на захват на уловките.

Като се има предвид (3) уравнение (2) добива вида:

$$j = \frac{(n_{t_0} q \delta)^2 \mu \tau}{2 \varepsilon \tau_0 L} \exp \left\{ -\frac{E}{kT} - \frac{2}{b \tau_0} \int_{\tau_0}^{\tau} \exp \left(-\frac{E}{kT} dT \right) \right\}. \quad (4)$$

От кривите на ТСД могат да бъдат определени:

1. Общият, натрупан в диелектрика заряд - Q

$$Q = S \int_0^{\infty} j dt, \quad (5)$$

където S - площта на електрода.

2) Типа на кинетиката

За тази цел се въвеждат означенията (Фиг. 3): $\Delta T = T'' - T'$ - полуширина на пиковете на ТСД.

$\Delta' = T_M - T'$ - парциална полуширина на нарастващия участък на кривите на ТСД.

$\Delta'' = T'' - T_M$ - парциална полуширина на спадащия участък на кривите на ТСД.

Ако $\Delta' > \Delta''$, налице е мономолекулярен рекомбинационен процес.

Ако $\Delta' < \Delta''$, налице е бимолекулярен рекомбинационен процес.

3) Енергията на активация (дълбочина на уловките)

а) оценка по положението на максимума на тока.

В общия случай

$$E = \Phi_k T_M, \quad (6)$$

където Φ - функция на много параметри и има стойност $18 \leq \Phi \leq 28$.

Най-често се среща съотношението

$$E = 22,5kT_M \quad (7)$$

Дава се и емпирична формула за определяне на E в електрон-волти.

$$E = \frac{T_M}{500} \text{ [eV]} \quad (8)$$

б) оценка на полуширината на пиковете на ТСД

$$E' = \frac{1,5kT_M^2 T'}{T_M - T'} \quad (9)$$

за нискотемпературната част на пика на ТСД и

$$E'' = \frac{kT_M^2}{T'' - T_M} \quad (10)$$

за високотемпературната част на пика.

в) метод на началното нарастване (на Гарлик и Гибсън).

Същността на метода се заключава в това, че нарастването на нискотемпературната част на пика на ТСД е пропорционално на $\left[\exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \right]$ при температури, достатъчно

по-ниски от температурата на максимума T_M . При това условие може да се запише:

$$\ln j = \ln A - \frac{E}{kT} \quad (11)$$

Графично зависимостта $\ln j = f\left(\frac{1}{T}\right)$ се изразява с права линия (Фиг. 4) с наклон

$$\frac{E}{k}$$

Фиг. 4

От тази графика може да се определи E по формулата:

$$E = k \frac{\ln j_2 - \ln j_1}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}. \quad (12)$$

Този метод се счита за най-добър, понеже не зависи от типа на кинетиката.

г) оценка на връзката между T_M и b .

При $T = T_M$, при която $j = j_M$ може да се запише:

$$\frac{E}{kT_M^2} = \frac{2}{b\tau_0} \exp\left[-\frac{E}{kT_M}\right], \quad (13)$$

откъдето за E се получава:

$$E = k \frac{T_{M_1} T_{M_2}}{T_{M_2} - T_{M_1}} \ln\left(\frac{b_1 T_{M_2}^2}{b_2 T_{M_1}^2}\right), \quad (14)$$

където T_{M_1} и T_{M_2} - са температурите на максимумите при две скорости на нагряване b_1 и b_2 съответно.

д) с използване на цялата крива на ТСТ. В този случай за E се получава зависимостта

$$\ln \frac{\int_{b(T)}^{\infty} I(t') dT}{T(t)} = \ln \tau_0 + \frac{E}{kT} \quad (15)$$

4. Други параметри:

а) от (13) в (15) може да се определи τ_0 . От (13) се получава за τ_0 :

$$\tau_0 = \frac{2kT_M^2}{bE} \exp\left[-\frac{E}{kT_M}\right]. \quad (16)$$

б) знаейки E и τ_0 може да се определи времето на релаксация τ

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E}{kT}\right). \quad (17)$$

в) ако се измери повърхностната плътност на заряда σ_{eff} , може да се определи дълбочината на проникване на заряда:

$$\delta = \frac{2L\left(\frac{\theta}{s}\right)}{\sigma_{eff} + \left(\frac{Q}{s}\right)}. \quad (18)$$

г) След определяне на δ може да се определи началната плътност на захванатите заряди:

$$n_0 = \frac{Q}{q\delta s} \frac{2L}{\delta}, \quad (19)$$

произведението на подвижностите и времето на релаксация

$$\mu\tau = \varepsilon \frac{\delta}{L} \frac{\delta s}{Q} \quad (20)$$

и сечението на захвата на уловките:

$$S_i = \frac{1}{N_C \nu \tau_0} \quad (21)$$

В последната формула обикновено се предполага $\nu \sim 10^5$ m/s и $N_C = 2,5 \cdot 10^{25}$ m⁻³.

гл. ас. д-р Иван Бодуров

Пловдивски университет „Паисий Хилендарски“

Физико-технологичен факултет

катедра „Физика“

<http://web.uni-plovdiv.bg/bodurov>

e-mail: bodurov@uni-plovdiv.net