

УДК 538.956:537.311.322

## ПОВЕДІНКА НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ ДИСПЕРСІЇ У КРИСТАЛАХ GaSe ЗІ ЗМІНОЮ ТЕМПЕРАТУРИ

О. ФЛЮНТ

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна  
flunt@electronics.wups.lviv.ua*

Для пояснення поведінки низькочастотної дисперсії у кристалах GaSe у разі зміни температури запропоновано модель на підставі розподілу ефективних диполів середовища за часами релаксації з термоактивованою поведінкою. Відповідно до моделі, діелектричний відгук на певній частоті в діапазоні домінування низькочастотної дисперсії зумовлений не стільки ефективними диполями середовища з відповідними характерними частотами, скільки сумарним внеском цих ефективних диполів і низки диполів з більшими часами релаксації. Модель пояснює незалежність показника степеня низькочастотної дисперсії від температури, дає змогу оцінити енергію активації низькочастотної дисперсії та пояснює залежність енергії активації від температурного діапазону домінування низькочастотної дисперсії.

*Ключові слова:* діелектричний спектр, низькочастотна дисперсія, універсальний степеневий закон релаксації.

У сучасній діелектричній спектроскопії виділяють два основні типи спектрів – дипольного типу та типу низькочастотна дисперсія (НЧД), для якого характерне сильне необмежене зростання як діелектричної проникності, так і діелектричних втрат у разі зниження частоти [1–3]. У частотному діапазоні, де домінує НЧД, дійсна та уявна частини комплексної діелектричної проникності залежать від частоти пропорційно до степеневого закону  $1/\omega^{1-n}$ , де  $\omega$  – циклічна частота, а значення  $1-n$  переважно близьке до одиниці [4–7].

Часто форма НЧД, побудованої у подвійних логарифмічних координатах, не залежить від температури, а спектр зміщується у напрямі вищих частот у разі підвищення температури. Переважно поведінку такої НЧД зі зміною температури можна описати за допомогою однієї енергії активації. Проте важко пояснити, як середовище, часи релаксації диполів якого розподілені в широкому діапазоні, багато порядків за величиною, у разі зміни температури поводить себе як таке, якому нібито властивий один процес з однією енергією активації та одним часом релаксації. Характерну для НЧД енергію активації, визначену за частотним зсувом спектра зі зміною температури, пов'язують з висотою певного енергетичного бар'єра, який повинні долати носії електричного заряду у процесі переміщення [4].

НЧД спостерігають і у напівпровідникових монокристалах. Зокрема, добре виражені спектри типу НЧД у широких частотних діапазонах та з різними значеннями показників степеня спостерігали у високоомних кристалах GaAs [8]. Тому НЧД, зокрема, беруть до уваги в разі конструювання напівпровідникових приладів на основі арсеніду галію.

Низькочастотний діелектричний спектр низькоомних кристалів GaSe за температури 90 К показаний на рис. 1 у формі комплексної ємності  $C^* = C_1 - jC_2$ , де  $j$  – уявна одиниця;  $C_1$  та  $C_2$  – дійсна та уявна складові комплексної ємності, відповідно. На цьому спектрі домінує НЧД з енергією активації 0,19 еВ та нахилом частотних залежностей у подвійних логарифмічних координатах  $-(1-n) = 0,81$ , який не залежить від температури [9];  $C_2$  зростає приблизно на три порядки у разі зниження частоти на чотири порядки, що дає підстави вважати степеневий закон залежності ємності від частоти достовірним.

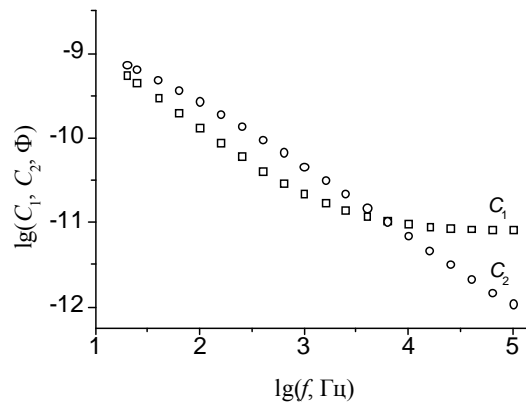


Рис. 1. Низькочастотний діелектричний спектр низькоомних кристалів GaSe за температури 90 К.

Для пояснення поведінки НЧД зі зміною температури вважатимемо, що в середовищі є певні дипольні утворення, часи релаксації яких розподілені відповідно до степеневих залежностей від частоти з нецілим, меншим від одиниці показником степеня. Модель на підставі розподілу термоактивованих ефективних диполів за часами релаксації дала змогу пояснити поведінку низькочастотних діелектричних спектрів, характерних для систем зі стрибкоподібним переміщенням носіїв електричних зарядів у разі зміни температури [10, 11]. Дискретну функцію розподілу ефективних диполів  $g(f)$  від частоти  $f$  можна задати виразом

$$g(f) = \frac{\Delta N f}{\Delta f} = \frac{g_0}{f^{1-n}} = \frac{g_0}{10^{(1-n)i}}, \quad (1)$$

де  $i$  – цілі числа,  $0 < n < 1$ , значення якого у разі домінування НЧД близьке до нуля.

Для розгляду характеру поведінки діелектричного спектра у разі зміни температури використаємо уявну складову комплексної ємності  $C_2$ . На відміну від спектрів з малими значеннями  $1-n$  [10, 11], у разі розгляду спектра, на якому домінує НЧД, для обчислення значення  $C_2$  на певній частоті обов'язково треба враховувати значення функції розподілу і для менших значень  $f$ .

$$C_2(f_i) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(f_k) \frac{f/f_k}{1 + (f/f_k)^2}. \quad (2)$$

Вагомий внесок у цю суму роблять доданки, індекс яких дорівнює або менший від значення  $i$ . Тому суму (2) можна записати у вигляді

$$C_2(f_i) = \sum_{k=i}^{-\infty} g(f_k) \frac{f/f_k}{1 + (f/f_k)^2}. \quad (3)$$

Форма спектра, отриманого внаслідок такого дискретного розподілу диполів за часами релаксації, відповідно до степеневому закону з  $1 - n = 0,7$ , показано на рис. 2. Дискретний розподіл добре відтворює степеневу залежність уявної частини ємності від частоти без помітних відхилень унаслідок того, що значення спектра в кожній точці формується диполями з багатьма різними часами релаксації.

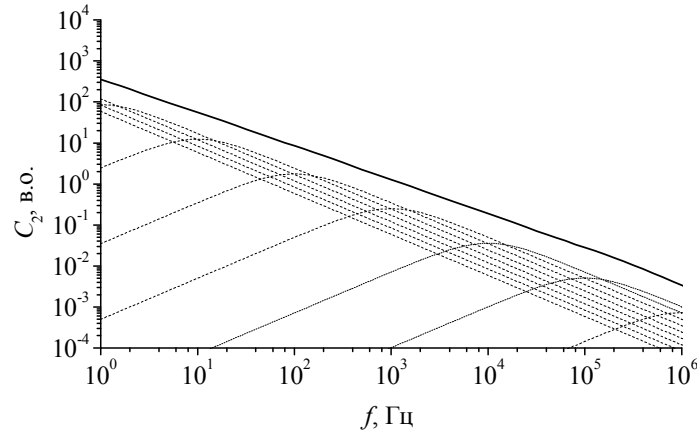


Рис. 2. Форма частотної залежності уявної частини ємності (суцільна лінія), утворена внаслідок підсумовування зміщених по фазі на  $\pi/2$  складових відгуку ефективних диполів зі степеневим дискретним розподілом концентрації за часами релаксації, відповідно до степеневому закону з  $1 - n = 0,7$  (пунктирні лінії).

З урахуванням (1) вираз (3) можна переписати так:

$$\begin{aligned} C_2(f_i) &= 0,5g(f_i) + 0,1g(f_{i-1}) + 0,01g(f_{i-2}) + \dots = 0,5g(f_i) + \sum_k \frac{g(f_{i-k})}{10^k} = \\ &= 0,5g(f_i) + g(f_i) \sum_k (1-n)^k = g(f_i) \left\{ 0,5 + \frac{1-n}{n} \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

За умови  $n = 0,2$  вираз (4) матиме вигляд

$$C_2(f_i) = 0,5g(f_i) + 4g(f_i) = 4,5g(f_i), \quad (5)$$

звідки бачимо, що внесок складових диполів з характерними частотами, меншими від частоти  $f_i$ , дорівнює 80 відсотків. Це засвідчує, що значення спектра від температури на частоті  $f_i$  більше зумовлене складовими на нижчих частотах, ніж на заданій, і те, що для

опису поведінки діелектричної проникності на певній частоті в діапазоні домінування НЧД обов'язково треба враховувати внесок складових з характерними частотами, нижчими від заданої.

Надалі порівнюємо внесок складової на відповідній частоті з внеском складових ефективних диполів на нижчих частотах у разі зміни температури. Збільшення уявної частини ємності у разі підвищення температури на  $\Delta T$ , зумовлене ефективними диполями з часами релаксації, які відповідають заданій частоті  $f_i$ , можна записати у вигляді

$$\frac{\Delta C_{2,i}}{g(f_i)} = 0,5(1-n) \ln\left(\frac{f_0}{f_i}\right) \frac{\Delta T}{T}, \quad (6)$$

а диполями з характерними частотами  $f_{i-k}$  –

$$\frac{\Delta C_{2,i-k}}{g(f_i)} = (1-n)^k \ln\left(\frac{f_0}{f_{i-k}}\right) \frac{\Delta T}{T} = (1-n)^k \ln\left(\frac{f_0}{f_i}\right) \frac{\Delta T}{T} + \ln(10)(1-n)^k k \frac{\Delta T}{T} \quad (7)$$

У разі врахування внеску, зумовленого всіма складовими з характерними частотами, меншими від  $f_i$ , зміна  $\Delta C_2(f_i)$  матиме вигляд

$$\frac{\Delta C_2}{g(f_i)} = 0,5(1-n) \ln\left(\frac{f_0}{f_i}\right) \frac{\Delta T}{T} + \sum_{k=1}^{\infty} (1-n)^k \ln\left(\frac{f_0}{f_i}\right) \frac{\Delta T}{T} + \ln(10) \sum_{k=1}^{\infty} (1-n)^k k \frac{\Delta T}{T} \quad (8)$$

Після підрахунку сум вираз (8) набуде вигляду

$$\frac{\Delta C_2}{g(f_i)} = 0,5(1-n) \ln\left(\frac{f_0}{f_i}\right) \frac{\Delta T}{T} + \frac{1-n}{n} \ln\left(\frac{f_0}{f_i}\right) \frac{\Delta T}{T} + \ln(10) \frac{1-n}{n^2} \frac{\Delta T}{T} \quad (9)$$

де  $g(f_i)$  задаємо виразом (4).

Для опису поведінки НЧД у разі зміни температури важливо пояснити незалежність показника степеня  $n$  від температури. Перші два доданки у виразі (9) є частотно-залежними, що в підсумку приводило б до збільшення  $(1-n)$  з підвищенням температури. Однак третій частотно-незалежний вагомий доданок послаблюватиме цю залежність. Якщо суму рядів у виразі (9) обмежити скінченною кількістю доданків, то третій доданок даватиме внесок, який буде меншим для кожного більш низькочастотного значення (9), ще значніше послаблюючи залежність  $n$  від температури.

Отже, можна стверджувати, що значення комплексної ємності на певній частоті в діапазоні домінування НЧД зумовлене сумою внесків ряду ефективних диполів середовища з відповідними часами релаксації та меншими від тих, які відповідають заданій частоті. Запропонована модель розподілу термоактивованих ефективних диполів середовища з розподілом часів релаксації відповідно до степеневі залежності може пояснити поведінку НЧД у разі зміни температури, дає змогу оцінити характерну енергію активації та пояснити залежність енергії активації від температурного діапазону, у якому домінує НЧД.

1. Jonscher A. K. Dielectric relaxation in solids // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1999. – Vol. 32. – N 14. – P. R57–R70.
2. Jonscher A. K. Universal Relaxation law. – London: Chelsea Press, 1996. – 415 p.

3. *Dissado L.* Dielectric Response // Kasap S., Capper P. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials. – New-York: Springer, 2006. – P. 187–212.
4. *Dyre J. C., Schröder T. B.* Universality of ac conduction in disordered solids // Reviews of Modern Physics. – 2000. – Vol. 72. – N 3. – P. 873–892.
5. *Jonscher A. K., Frost M. S.* Weakly frequency-dependent electrical conductivity in a chalcogenide glass // Thin Solid Films. – 1976. – Vol. 37. – N 2. – P. 267–273.
6. *Dissado L. A., Hill R. M.* Anomalous low-frequency dispersion. Near direct current conductivity in disordered low-dimensional materials // J. Chem. Soc. Faraday Trans. – 1984. – Vol. 80. – N 3. – P. 291–319.
7. *Jonscher A. K.* Low frequency dispersion in volume and interfacial situations // J. Mater. Science. – 1991. – Vol. 26. – N 6. – P. 1618–1626.
8. *Jonscher A. K.* Dielectric spectroscopy of semi-insulating GaAs // Semicond. Sci. Technol. – 1986. – Vol. 1. – N 1. – P. 71–92.
9. *Стахіра Й., Флюнт О., Фіяла Я.* Низькочастотний діелектричний спектр низькоомних кристалів GaSe // Журн. фіз. досліджень. – 1998. – Т. 2. – № 1. – С. 136–138.
10. *Флюнт О.* Застосування моделі дискретного розподілу часів релаксації для опису діелектричної дисперсії у високоомних кристалах GaSe // Теор. електротехніка. – 2010. – Вип. 61. – С. 60–68.
11. *Флюнт О.* Особливості температурної залежності діелектричної проникності високоомних кристалів GaSe в рамках моделі розподілу ефективних диполів за часами релаксації Електроніка та інформ. технології. – 2011. – Вип. 1. – С. 142–148.

## BEHAVIOR OF LOW-FREQUENCY DISPERSION IN GaSe CRYSTALS WITH TEMPERATURE CHANGES

O. Flunt

*Ivan Franko National University of Lviv  
50 Drahomanov St., UA-79005 Lviv, Ukraine*

The model based on distribution of effective dipoles over the relaxation times has been suggested for explanation of temperature behavior of the low-frequency dispersion (LFD) occurring in GaSe crystals. According to the model, the dielectric response at a certain frequency, within the range dominated by the LFD, is caused by a summing contribution of the effective dipoles with the corresponding or longer relaxation times, rather than by the effective dipoles of the media with the corresponding characteristic frequencies. The model explains independence of the LFD exponent on the temperature, thus allowing estimation of the activation energy of the LFD and explaining dependence of the activation energy on temperature in the range dominated by the LFD.

*Key words:* dielectric spectrum, low frequency dispersion, universal power relaxation law.

---

**ПОВЕДЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ  
В КРИСТАЛЛАХ GaSe С ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**О. Флюнт**

*Львовский национальный университет имени Ивана Франко  
ул. Драгоманова, 50, 79005 Львов, Украина*

Для объяснения поведения низкочастотной дисперсии (НЧД) для кристаллов GaSe с изменением температуры предложена модель на основе распределения эффективных диполей среды по временам релаксации с термоактивированным поведением. Согласно модели, диэлектрический отклик на некоторой частоте в диапазоне доминирования низкочастотной дисперсии обусловлен не столько эффективными диполями среды с соответствующими характерными частотами, сколько суммарным вкладом ряда эффективных диполей среды с соответствующими или большими временами релаксации. Модель объясняет независимость показателя степени низкочастотной дисперсии от температуры, дает возможность оценить энергию активации и объясняет ее зависимость от температурного диапазона доминирования низкочастотной дисперсии.

*Ключевые слова:* диэлектрический спектр, низкочастотная дисперсия, универсальный степенной закон релаксации.

Стаття надійшла до редколегії 06.02.2012  
Прийнята до друку 20.03.2012