ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 2, № 1 (1998) с. 136–138

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 2, No 1 (1998) p. 136–138

НИЗЬКОЧАСТОТНИЙ ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ СПЕКТР НИЗЬКООМНИХ КРИСТАЛІВ GaSe

Й. Стахіра, О. Флюнт, Я. Фіяла
Львівський державний університет імені Івана Франка, кафедра фізики напівпровідників, вул. Драгоманова, 50, Львів, UA–290005, Україна
(Отримано 13 січня 1997)

Досліджено діелектричний спектр низькоомних (~ 300 Ом·см при кімнатній температурі) шаруватих кристалів GaSe вздовж оси c. Вимірювання проводили на частотах 20 Гц–100 кГц та при температурах, близьких до температури рідкого азоту. Нормований діелектричний спектр проаналізовано з допомогою еквівалентних схем, які містять і які не містять дисперсних конденсаторів зі степеневою залежністю ємности від частоти. У результаті показано, що діелектричний спектр низькоомних кристалів GaSe підпорядковується "універсальному" степеневому законові діелектричного відгуку і не може бути пояснений з допомогою дебаївської моделі. Причина степеневої залежности діелектричного спектра від частоти пов'язується з колективною взаємодією локалізованих носіїв електричного заряду.

Ключові слова: діелектрична спектроскопія напівпровідників, шаруватий напівпровідник, колективна взаємодія.

PACS number(s): 77.22.-d, 72.20.Jv

Електронні переходи в напівпровідниках між локалізованими рівнями в забороненій зоні або між локалізованими рівнями і дозволеними зонами в багатьох випадках еквівалентні обертанням диполів, які раптово змінюють свою орієнтацію між енерґетично вигідними положеннями. Оскільки реакція електронів на зміну прикладеного електричного поля є дещо запізненою, то їхній відгук реєструється у вигляді комплексної діелектричної сприйнятливости [1–3].

З невеликої кількости експериментальних робіт, присвячених низькочастотній діелектричній спектроскопії напівпровідників, випливає, що форма діелектричного спектра напівпровідникових матеріялів відповідає "універсальному" степеневому законові діелектричного відгуку [3, 4], відповідно до якого дійсна і уявна частини комплексної сприйнятливости залежать від частоти за однаковим степеневим законом:

$$\chi'(\omega) + j\chi'(\omega) \sim (j\omega)^{n-1} = \left\{\sin\frac{n\pi}{2} - j\cos\frac{n\pi}{2}\right\}\omega^{n-1}, \tag{1}$$

де n приймає будь-яке значення з інтервалу від нуля до одиниці. Така залежність принципово відрізняється від загальноприйнятого дебаївського закону, який у своїй високочастотній області характеризується співвідношеннями

$$\chi'(\omega) \sim \omega^{-2}; \quad \chi''(\omega) \sim \omega^{-1}. \tag{2}$$

Тому за критерієм паралельности залежностей дійсної та уявної компонент діелектричної сприйнятливости у подвійних логарифмічних координатах можна визначити, якому з двох законів відповідає спектр. Однак реальний спектр, як правило, є наслідком накладання різних поляризаційних процесів, що не дає змоги спостерігати паралельні лінії на достатньо широкому частотному діяпазоні або ж спостерігати їх узагалі. Тому в цій роботі для аналізу діелектричних спектрів низькоомних кристалів GaSe використано метод еквівалентних схем, який дає змогу докладніше зрозуміти поведінку спектра і, як це буде показано нижче, чітко визначити, яким законом, "універсальним" чи дебаївським, він описується.

Кристали GaSe для вимірювань вирощували зі стехіометричного розплаву у кварцевих ампулах методом Бріджмена–Стокбарґера. Отримані кристали були p-типу провідности з питомим опором 300 Ом·см при кімнатній температурі [6, 7]. Вибір низькоомних кристалів за об'єкти досліджень пояснюється тим, що, згідно з [5], високий питомий опір кристалів GaSe (10^5–10^{10} Ом·см при кімнатний температурі) зумовлений їхньою неоднорідністю. Напаяні на обидві свіжосколені поверхні кристалів індієві контакти виконували роль обкладок конденсатора. Зразки, середній розмір яких становив 7·7·0.8 мм^3, поміщали у кріостат з малою перехідною ємністю між електродами і охолоджували до низьких температур.

Вимірювання проводили методом перетворення комплексної ємности у пропорційну напругу [8]. Основний елемент установки — перетворювач ємність-напруга — був зібраний на основі швидкодіючого операційного підсилювача. Досліджували діелектричні спектри у частотному діяпазоні 20 Гц–100 кГц з діючим значенням прикладеної до зразка змінної напруги 100 mВ.

Ряд діелектричних спектрів низькоомних кристалів GaSe у температурному діяпазоні 90–126 К показано на рис. 1. Результати виражені у формі комплексної ємности $C^* = C' - jC''$, оскільки вони містять ділянки, які зумовлені бар'єрними ємностями на контактах. На низьких частотах та при високих температурах спостерігаємо ділянку втрат C" з нахилом -1, яка зумовлена провідністю зразка на постійному струмі. Високочастотна складова ємности C_∞, до якої наближається дійсна частина ємности C' при температурі 90 K, близька за значенням до величини ємности, обчисленої виходячи з геометрії зразка та високочастотної діелектричної проникности [9].

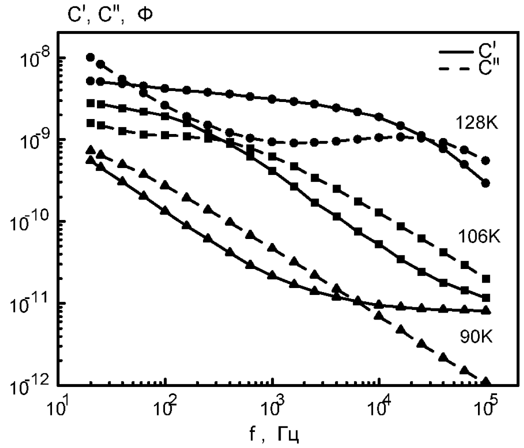

Рис. 1. Діелектричний спектр низькоомних кристалів GaSe вздовж оси c при різних температурах. Спектр виражено у формі комплексної ємности.

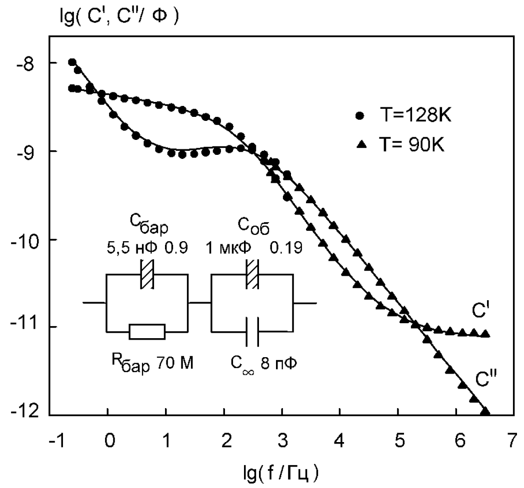

Рис. 2. Нормований до температури 106 K діелектричний спектр низькоомних кристалів GaSe та спектр, отриманий з допомогою еквівалентної схеми, яка містить дисперсні конденсатори (показаний суцільною лінією).

З метою отримання єдиного графіка на ширшому частотному діяпазоні проведено нормування спектра, яке полягає у зміщенні експериментальних залежностей, що відповідають різним температурам уздовж оси частот. Нормований до температури 106 K спектр низькоомних кристалів GaSe показано на рис. 2, де зображено лише дві спектральні залежності, які відповідають двом різним температурам, оскільки форма спектра не залежить від температури, за винятком тих ділянок утрат, що зумовлені провідністю зразка на постійному струмі. Енерґія активації, отримана зі зсуву спектра по осі частот, дорівнює 0.19 еВ. На частотних залежностях дійсної частини ємности C' у подвійному логарифмічному масштабі простежуємо дві лінійні ділянки з суттєво різними нахилами: слабо дисперсну з нахилом -0.10, та сильно дисперсну з нахилом -0.81. Перехід від однієї дисперсної ділянки до іншої супроводжується максимумом на частотних залежностях діелектричних утрат C''. Дві лінійні ділянки з суттєво різними нахилами на залежностях C' відображають два дисперсні процеси, які увімкнені послідовно. У протилежному випадку, сильно дисперсна ділянка домінувала б на нижчих частотах порівняно зі слабо дисперсною. Тому еквівалентна схема, що пояснює отриманий діелектричний спектр, теж складається з двох з'єднаних послідовно частин. Кожна з них містить дисперсний конденсатор [3], ємність якого залежить від частоти за степеневим законом

$$C^* = B(j\omega)^{n-1} = B\left\{\sin\frac{n\pi}{2} - j\cos\frac{n\pi}{2}\right\}\omega^{n-1}, \qquad (3)$$

де $0 < n < 1$, B — константа, і який фактично відображає наявність у спектрі тих механізмів поляризації, які підпорядковуються "універсальному" законові діелектричного відгуку (2). Вважається, що ліва частина схеми відповідає бар'єрним ємностям біля контактів, а права — відгукові електронейтрального об'єму матеріялу. Максимум на частотних залежностях діелектричних утрат у цьому випадку пояснюємо послідовним увімкненням двох дисперсних конденсаторів.

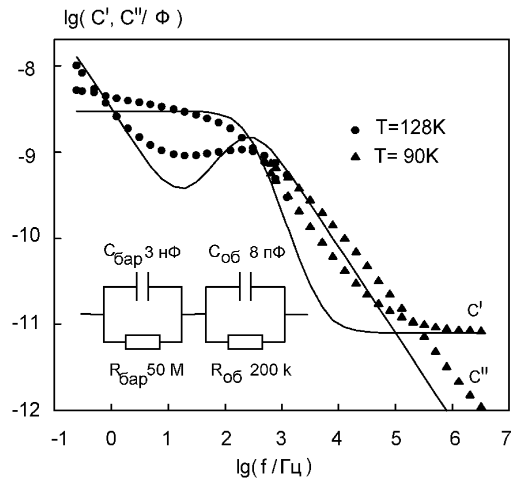

Рис. 3. Нормований до температури 106 K діелектричний спектр низькоомних кристалів GaSe та спектр, отриманий з допомогою еквівалентної схеми, яка містить тільки ідеальні конденсатори (показаний суцільною лінією).

Для порівняння на рис. 3 показано спектр, який відповідає схемі заміщення, побудованій з використанням лише ідеальних конденсаторів, тобто адекватний дебаївському спектрові (2). Звідси видно, що дебаївська форма спектра не може пояснити експериментальні залежності ні у низькочастотній, ні у високочастотній області, тоді як "універсальний" степеневий закон добре збігається з експериментальними даними.

Згідно з [2, 3], степеневу залежність діелектричних спектрів напівпровідників від частоти пояснюємо колективною взаємодією локалізованих носіїв електричного заряду. Така багаточастинкова взаємодія приводить до часткового екранування кожного локалізованого заряду. У результаті цього, енерґія заселеного центра локалізації є дещо нижчою на величину Δ порівняно з енерґією незаселеного. Причому втрата енерґії у процесі стрибка заряду з одного центра на інший є незворотною і однаковою за величиною [2]. Різниця енерґій Δ та значення експоненти n залежать від кількости взаємодіючих зарядів, тобто тих, які знаходяться в межах "радіуса кулонівського екранування" цього локалізованого заряду.

[1] A. K. Jonscher, Solid–State Electron. **33**, 737 (1990).
[2] A. K. Jonscher, Solid–State Electron. **33**, 139 (1990).
[3] A. K. Jonscher, C. Pickup and Sh. H. Zaidi, Semicond. Sci. Technol. **1**, 71 (1986)
[4] M. Kh. Anis, R. A. Hashmi, M. U. Shahrukh and Maqsooda Sahba, Physica B **179**, 278 (1992).
[5] А. Ш. Абдинов, А. А. Ахмедов, Докл. Акад. Наук АзССР **34**, 22 (1978).
[6] F. I. Ismailov, G. A. Akhundov, O. R. Vernich, Phys. Status Solidi **17**, K237 (1966).
[7] C. Tatsuyama, C. Hamaguhi, H. Tomita, J. Nakai, Jpn. J. Appl. Phys. **10**, 1698 (1971).
[8] *Справочник по радиоизмерительным приборам. В 2-х томах. Т. 1. Измерение напряжений, параметров элементов и цепей. Источники питания*, под ред. В. С. Носова (Советское радио, Москва, 1976).
[9] R. Minder, G. Ottaviani, C. Canali, J. Phys. Chem. Solids **37**, 417 (1976).

LOW-FREQUENCY DIELECTRIC SPECTRA OF LOW-RESISTIVITY GaSe CRYSTALS

J. Stakhira, O. Fl'unt, Ya. Fiyala
Ivan Franko Lviv State University, Chair of Semiconductor Physics
50 Drahomanov Str., Lviv UA-290005, Ukraine

The low-frequency dielectric response of low-resistivity GaSe layered crystal along the c-axis has been investigated at liquid nitrogen temperatures. The normalized spectra (activation energies from frequency shift is 0.19 eV) have been treated analytically employing equivalent circuits. It is shown that experimental data cannot be obtained with the circuit containing only ideal capacitors and resistors. At the same time, the equivalent circuit containing dispersive capacitors characterized by the power law dependence on frequency $C^* = B(j\omega)^{n-1}$, where ω is radian frequency, $0 < n < 1$, gives a good agreement with experimental data. This means that measured response of low-resistivity GaSe crystals follows the "universal" power law of dielectric response $\chi^* \sim (j\omega)^{n-1}$, but not the Debye one. The nature of the "universal" power law is explained by many-body interactions between localized charge carriers.

The measurement was carried out by transducing of capacity in voltage in the frequency range of 20 Hz–100 kHz. Samples for study were cloven parallel to the layer with the thickness of $\sim$0.8 mm^2 from GaSe crystal with resistivity $\sim$ 300 Ohm·cm at room temperature. The indium contacts soldered on both fresh cleavages were used as plates of capacitor.