

природи. Изменение электрофизических параметров материала и характерных времен акустоэлектронного релаксационного процесса приводит к исчезновению исходных пиков ВТ и возникновению новых пиков ВТ на более низкой температуре и с более низкими энергиями активации.

Проведенные эксперименты показали, что увеличение компенсирующей примеси хрома в GaAs<Cr> не оказывает существенного влияния на стабильность пиков ВТ, а следовательно, и полуизолирующих свойств материала при термическом отжиге. Это может быть связано с тем, что снижение удельного сопротивления кристалла в результате термообработки связано с появлением термоакцепторов, которые не могут быть компенсированы введением избыточных примесных центров хрома, являющихся, по-видимому, глубокими акцепторами. Акцепторная природа примесных центров Cr в GaAs не является однозначно установленной, но подтверждается большинством литературных данных и результатами наших экспериментов.

Было установлено, что наличие некоторого количества мелкой донорной примеси в исходных образцах при осуществлении компенсации глубокими центрами приводит к повышению термической стабильности исходных пиков ВТ а значит и полуизолирующих свойств GaAs. Этот результат может быть объяснен дополнительной компенсацией возникающих при отжиге термоакцепторов избыточным количеством мелкой донорной примеси. Концентрация этой примеси, равная $4,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, по порядку величины близка к пределу растворимости Cr в GaAs. В связи с этим можно предположить, что такое количество доноров не превышает значительно концентрацию компенсирующих центров Cr, но одновременно создает равновесную ситуацию, при которой наличие такой концентрации донорной примеси обеспечивает нейтрализацию акцепторов, возникающих при отжиге.

Таким образом, исследование динамики изменения параметров пиков ВТ, обусловленных ГЦ, определяющими электрические свойства полупроводника, дает возможность бесконтактным неразрушающим методом изучать процессы изменения электрофизических свойств полупроводника в результате термического отжига.

[1]. Mitrokhin V. I., Rembeza S. I., Sviridov V.V., Yaroslavtsev N. P., Acoustic Probing of Deep Centers in III-V semiconductors // Phys. Status Sol. (a). 1990/ V. 119. № 2 P. 535-544

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ РЕЛАКСАЦІЇ У ВИСОКООМНОМУ СЕЛЕНІДІ ЦИНКУ

Ковальов Л.Є., Краснобокий Ю.М.
СУФІМБ, УДПУ м. Умань, Україна

Діелектричний відгук будь-якого матеріалу може бути визначений у термах часової залежності струму деполізації, який призводить до зникнення поляризаційного поля E_0 :

$$i(t) = \frac{dP}{dt} = \varepsilon_0 E_0 f(t)$$

де $P(t)$ – поляризація зразка, яка залежить від часу; ε_0 – діелектрична проникність у вакуумі; $f(t)$ – функція діелектричного відгуку.

З іншого боку, діелектричний відгук може бути описаний у термах частотної залежності комплексної діелектричної проникності $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)$, яка є фур'є-перетворенням $f(t)$.

Цей факт покладений в основу роботи експериментальної установки, яка дозволяє проводити дослідження діелектричних характеристик високоомних матеріалів в діапазоні частот $10^{-2} - 10^6$ Гц та інтервалі температур 130 – 450 К. В діапазоні частот $10^5 - 10^9$ Гц для дослідження діелектричних характеристик високоомного з фоновими домішками селениду цинку використовувалась установка, робота якої ґрунтується на методі зосередженої ємності (ефект зміни ємності хвильоводу при введенні в одну з його ділянок досліджуваного матеріалу).

З частотних залежностей дійсної та уявної частин діелектричної проникності досліджуваних зразків високоомного селениду цинку була побудована діаграма Коула-Коула, яка представлена на рисунку.

З вигляду діаграми випливає, що діелектричні характеристики високоомного $ZnSe$ з фоновими домішками в діапазоні частот $10^{-2} - 10^9$ Гц не можуть бути описані в рамках класичної теорії дисперсії Дебая, яка з деякими наближеннями може бути застосована в області оптичних частот.

Класична модель Дебая ґрунтується на одночастинковому наближенні і знайшла свій подальший розвиток при урахуванні часу релаксації та ймовірності перескоку носіїв заряду з одного закріпленого стану в інший. Більш універсальним є емпіричний закон А.К. Джоншира, який заснований на багаточастинковому підході. Суть закону полягає в тому, що весь діапазон частотної залежності діелектричних характеристик матеріалів поділяється на області, в яких функція діелектричного відгуку описується степеневими законами з різними показниками [1]. Для діелектричної проникності в області максимуму діелектричних втрат ω_p мають місце співвідношення:

$$\varepsilon'(\omega) \approx \varepsilon(0) - a\omega^m, \quad \varepsilon''(\omega) \approx \omega^n \quad \text{при} \quad \omega \ll \omega_p;$$

$$\varepsilon(\varepsilon) \approx \frac{1}{1 + i\omega \omega_p} \quad \text{при} \quad \omega \approx \omega_p;$$

$$\varepsilon(\varepsilon) \approx (i\omega)^{n-1} \quad \text{при} \quad \omega \gg \omega_p,$$

де a – параметр, який не залежить від частоти, а показники степеня задовольняють співвідношення $0 \leq m \leq 1, 0 \leq n \leq 1$.

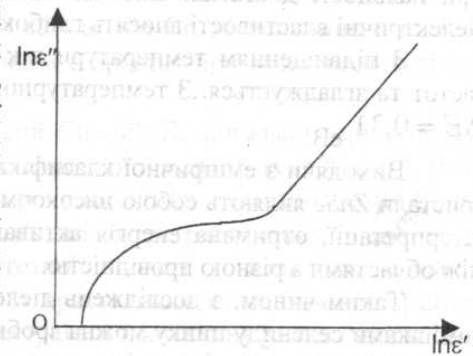
Для діелектричних систем з високою ступінню провідності в області низьких частот

$$\varepsilon''(\omega) \approx \omega^{-p}, \quad 0 \leq p \leq 1$$

Виходячи з багаточастинкового універсального закону на основі багатьох дослідних фактів А.К. Джоншир запропонував класифікацію діелектричних систем за виглядом частотних залежностей діелектричного відгуку [1].

Серед всіх зразків $ZnSe$ з фоновими домішками для більш детального дослідження були вибрані зразки, у яких в області низьких частот спостерігався слабкий пік діелектричних втрат.

Експериментальні частотні залежності уявної частини діелектричної проникності досліджуваних зразків можна розбити на три ділянки з різними кутами нахилу. В області низьких частот, де переважний внесок у діелектричні втрати вносять електрони провідності, хід частотної залежності може бути описаний степеневою залежністю з показником $p = 0,71$. В області піка діелектричних втрат, виходячи із закону Джоншира, показник



ступеня при $\omega > \omega_p$, $1 - n = 0,96$. Апроксимацією в області піка втрат при $\omega < \omega_p$ вдалося знайти значення $m \approx 0,01$.

Таким чином, при низьких частотах і високій температурі в діелектричному відгуку досліджуваних зразків *ZnSe* переважає провідність за постійним струмом. Діелектричні втрати характеризуються одним піком з малим значенням $m = 0,01$ і досить великим показником степеня $1 - n = 0,96$. Такий хід частотної залежності $\varepsilon''(\omega)$ з сильно асиметричним піком діелектричних втрат є типовим для систем з потенційними бар'єрами. При наявності достатньо високої концентрації вільних носіїв струму основний внесок у діелектричні властивості вносять глибокі локалізовані стани поблизу потенційного бар'єру.

З підвищенням температури пік діелектричних втрат зсувається в область більших частот та згладжується. З температурного зсуву піка втрат була визначена енергія активації $\Delta E = 0,31$ eV.

Виходячи з емпіричної класифікації Джоншира, можна припустити, що досліджувані кристали *ZnSe* являють собою високоомні матриці з низькоомними включеннями. При такій інтерпретації, отримана енергія активації описує деякий усереднений потенційний бар'єр між областями з різною провідністю.

Таким чином, з досліджень діелектричних характеристик високоомного з фоновими домішками селениду цинку можна зробити висновок, що вихідні кристали характеризуються неоднорідним розподілом фонових домішок та власних дефектів, які призводять до виникнення областей з різною ступінню електропровідності. Для з'ясування природи домішок та їх ролі необхідні додаткові дослідження інших характеристик цих напівпровідникових матеріалів.

1. Jonscher A.K., Dissado L.A. and Hill R.M. // Phys. Stat. Solidi (b). – 1980. – P. 102-126.

ВПЛИВ СТРУКТУРНОГО РОЗУПОРЯДКУВАННЯ НА ФОНОННІ ТА ЕЛЕКТРОННІ СПЕКТРИ СУПЕРІОННИХ КРИСТАЛІВ $\text{Cu}_{6+\delta}\text{PS}_5\text{Br}$

Студеняк І.П., Стефанович В.О., Біланчук В.В.,

Панько В.В., Студеняк Я.І.

Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна

Монокристали $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{Br}$ відомі як суперіонні провідники та сегнетоеластики [1]. При кімнатній температурі вони належать до кубічної сингонії (просторова група $F\bar{4}3m$), а при низьких температурах в них реалізуються два фазові переходи (ФП): сегнетоеластичний при $T_c = (268 \pm 2)$ К та суперіонний при $T_s = (166 - 180)$ К. Нижче температури сегнетоеластичного ФП вони відносяться до моноклінної сингонії (просторова група Cc), а суперіонний ФП має ознаки ізоструктурного перетворення [2]. В даній роботі розглядається вплив структурного розупорядкування, викликаного відхиленням від стехіометрії складу, на низькочастотну область фононних спектрів та параметри краю оптичного поглинання кристалів $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{Br}$, вирощених при різних технологічних умовах.

Для досліджень використовувалися монокристали $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{Br}$, отримані методом хімічних транспортних реакцій та синтезовані при різних технологічних умовах: а) з шихти стехіометричного складу з використанням галогена в ролі транспортного агента (ТА); б) з шихти стехіометричного складу з використанням CuBr у ролі ТА; в) з шихти, що містить надлишок $\text{CuBr} + \text{Cu}_2\text{S}$ у співвідношенні 3:1; г) з шихти, що містить надлишок $\text{CuBr} + \text{Cu}_2\text{S}$ у співвідношенні 1:3.