

УДК 621.315.592  
PACS number(s): 72.20.Jv.

## ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКОМБІНАЦІЙНОГО МЕХАНІЗМУ П'ЄЗОФОТОРЕЗИСТИВНОГО ЕФЕКТУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ

Б. Павлишенко, Р. Шувар

Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна

Проаналізовано частотні характеристики рекомбінаційного механізму п'єзофоторезистивного ефекту в лінійному наближенні в околі стаціонарного фотозбудження. Наведено асимптотичні наближення та результати числового моделювання.

*Ключові слова:* п'єзофоторезистивний ефект, рекомбінація, частотні характеристики.

У працях [1, 2] з'ясовано, що в напівпровідниках з простою структурою зон в умовах просторово однорідного фотозбудження п'єзофоторезистивний ефект у напівпровідниках (ПФРЕ) головно зумовлений рекомбінаційним механізмом, який залежить від впливу змінної деформації на темп термічної генерації носіїв з локальних рівнів у зони.

Ми проаналізували частотні характеристики рекомбінаційного механізму ПФРЕ в напівпровідниках з одним типом глибоких рекомбінаційних рівнів. Розглянемо випадок малих концентрацій рекомбінаційних центрів, вважаючи, що виконується умова біполярності

$$N_r, P_r \ll n + n_1, p + p_1; N_r + P_r = M_r \quad (1)$$

де  $n, p$  – концентрації вільних електронів та дірок;  $N_r, P_r$  – концентрації електронів та дірок, локалізованих на рекомбінаційних центрах;  $M_r$  – концентрація рекомбінаційних центрів;  $n_1, p_1$  – ефективні густини станів, зведені до рекомбінаційного рівня. Аналіз рівнянь неперервності для вільних та локалізованих носіїв заряду [1, 3] виконаємо за першою гармонікою методом комплексних амплітуд в околі стаціонарного фотозбудження в лінійному наближенні по тензору деформації [1, 2]. У заданому квазістаціонарному режимі комплексна амплітуда змінних концентрацій електронів та дірок має такий вигляд:

$$\Delta n = \frac{N_r \left[ p + p_1 + \frac{i\omega}{C_{pr}} \right] \Delta n_1 + P_r (n + n_1) \Delta p_1}{P_r \left[ p + p_1 + \frac{i\omega}{C_{pr}} \right] + N_r (n + n_1) + \frac{i\omega}{C_{nr} C_{pr}} (C_{nr} (n + n_1) + C_{pr} (p + p_1) + i\omega)} \quad (2)$$

$$\text{де } n_1 = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_r}{kT}\right]; \quad p_1 = N_v \exp\left[-\frac{E_r - E_v}{kT}\right];$$

$$\Delta n_1 = -\frac{\Delta E_c - \Delta E_r}{kT} n_1; \quad \Delta p_1 = -\frac{\Delta E_r - \Delta E_v}{kT} p_1;$$

$\omega$  – частота змінної деформації;  $E_c, E_v, E_r$  – енергетичне положення дна зони провідності, валентної зони та рекомбінаційного рівня;  $\Delta E_{c,v,r}$  – амплітуди зміни країв зон та рекомбінаційного рівня під впливом деформації;  $C_{nr}, C_{pr}$  – коефіцієнти захоплення електронів та дірок на рекомбінаційний рівень;  $N_c, N_v$  – ефективні густини станів у зоні провідності та у валентній зоні, відповідно.

Розглянемо асимптотичні наближення для  $\Delta n, \Delta p$  в області інтенсивності фотозбудження, яке зумовлює насичення заселеності рекомбінаційного рівня. З аналізу рівнянь неперервності [1,2] випливає, що в разі великих рівнів фотозбудження стаціонарні значення концентрацій носіїв, локалізованих на рекомбінаційному рівні, асимптотично наближаються до таких значень:

$$(N_r)_{\text{нас}} = M_r \frac{C_{nr}}{C_{nr} + C_{pr}}, \quad (P_r)_{\text{нас}} = M_r \frac{C_{pr}}{C_{nr} + C_{pr}}. \quad (3)$$

У разі великих рівнів фотозбудження можна припустити, що

$$n \cong p \cong G\tau \gg N_r, P_r, n_1, p_1, \quad (4)$$

де  $G$  – темп оптичної генерації нерівноважних носіїв заряду;  $\tau$  – час існування нерівноважних носіїв заряду. У квазістаціонарному випадку за умови  $\omega\tau \ll 1$  з лінійного аналізу рівнянь неперервності [1, 2] методом комплексних амплітуд отримано вирази для амплітуд змінних концентрацій

$$(\Delta n)_{\text{нас}} = (\Delta p)_{\text{нас}} = \frac{C_{nr} \Delta n_1 + C_{pr} \Delta p_1}{C_{nr} + C_{pr}}. \quad (5)$$

З аналізу виразу (2) на підставі врахування виразів (4), (5) отримаємо наближення для  $\Delta n, \Delta p$  в області великих рівнів фотозбудження в разі насичення заселеності рекомбінаційного рівня для довільних частот:

$$\Delta n(\omega)_{\text{нас}} = \Delta n_{\text{нас}}^o \frac{1}{1 + i\omega\tau(\omega)}, \quad (6)$$

де

$$\tau(\omega) = \frac{1}{M_r C_{nr} C_{pr}} \left[ C_{nr} + C_{pr} + \frac{i\omega}{G\tau} \right]. \quad (7)$$

Уведемо позначення

$$\tau_{no} = \frac{1}{M_r C_{nr}}, \quad \tau_{p0} = \frac{1}{M_r C_{pr}}, \quad \tau_o = \tau_{no} + \tau_{p0} \quad (8)$$

і знехтуємо величинами більшого порядку малості, тоді вираз (6) набуде вигляду

$$\Delta n(\omega)_{\text{нас}} = \Delta p(\omega)_{\text{нас}} = \Delta n_{\text{нас}}^o \frac{1}{1 + i\omega\tau_o}. \quad (9)$$

Отже, частотні характеристики ПФРЕ за наявності рекомбінаційних центрів одного типу в разі великих рівнів фотозбудження в області насичення виявляються на частотах, що визначені оберненим часом існування вільних носіїв і мають

монотонно спадний характер. Це підтверджено результатами числового моделювання амплітудно– та фазово–частотних характеристик (рис.1, 2).

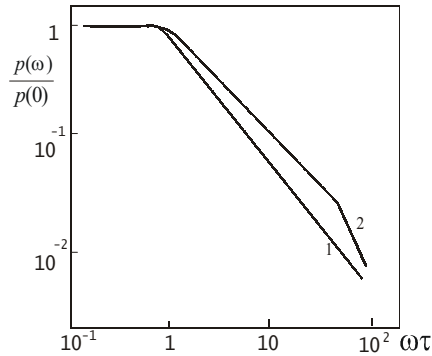


Рис. 1. Амплітудно–частотні характеристики комплексної амплітуди  $\Delta p$  для різних значень темпу оптичної генерації:  $G=10^{20}$  (крива 1) та  $10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  (крива 2).

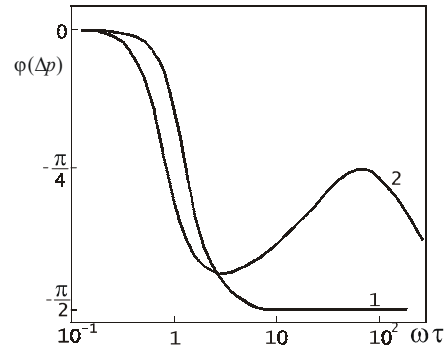


Рис. 2. Фазово–частотні характеристики комплексної амплітуди  $\Delta p$  для різних значень темпу оптичної генерації:  $G=10^{20}$  (крива 1) та  $10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  (крива 2).

Головні параметри напівпровідника для числових розрахунків прийнято такі: енергетичне положення країв зон –  $E_c=0.8 \text{ eV}$ ,  $E_v=0 \text{ eV}$ ; концентрація та енергетичний рівень залягання рекомбінаційних центрів –  $M_r=10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $E_r=0.3 \text{ eV}$ ; коефіцієнти захоплення носіїв на рекомбінаційні центри –  $C_{nr}=10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ ,  $C_{pr}=10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ ; концентрація та рівень залягання донорних домішок –  $M_d=10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $E_d=0.78 \text{ eV}$ ; амплітуда деформації енергетичних рівнів –  $\Delta E_c=-10^{-6} \text{ eV}$ ,  $\Delta E_v=-\Delta E_c$ ,  $\Delta E_r=0$ ; температура кристала –  $T=300 \text{ K}$ . Розрахунки комплексної амплітуди  $\Delta p$  виконано для різних значень темпу оптичної генерації:  $G=10^{20} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  (крива 1) та  $G=10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  (крива 2).

Проаналізуємо характер отриманих залежностей. В області квазістаціонарної деформації за умови  $\omega\tau \ll 1$  частотна залежність комплексної амплітуди не виявляється. Зі збільшенням частоти деформації та в разі виконання умови  $\omega\tau > 1$  модуль амплітуд  $\Delta n$ ,  $\Delta p$  починає спадати внаслідок зростання інертності динаміки носіїв щодо зростаючої частоти деформації. В області інтенсивності фотозбудження, коли не виявляється насичення заселеності рекомбінаційного рівня, частотні характеристики можуть мати особливості внаслідок виникнення частотної залежності часу релаксації (див. рис. 2).

Розглянемо вплив фотозбудження на фазочастотні характеристики ПФРЕ. Зміна зсуву фаз між змінною деформацією та змінними складовими концентрацій вільних носіїв за наявності одного рекомбінаційного рівня в забороненій зоні визначена впливом фотозбудження на часи релаксації змінних концентрацій.

Числові розрахунки залежності зсуву фаз від темпу оптичної генерації для розглянутої вище моделі напівпровідника за умови  $\omega\tau \approx 1$  показані на рис. 3. Залежність фазового зсуву від темпу оптичної генерації дає змогу цілеспрямовано змінювати фазу фотодеформаційного відгуку кристала за допомогою фотозбудження. На підставі цього ефекту можна створювати фазові модулятори, в яких несуча частота задана динамічною деформацією, а модульовальна – динамічним оптичним збудженням.

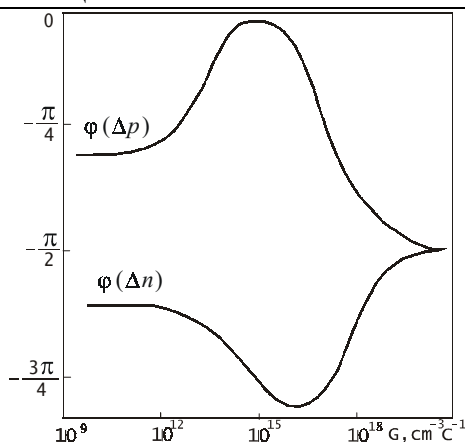


Рис. 3. Залежність фаз комплексних амплітуд від темпу оптичної генерації.

1. Стахіра Й. М., Шувар Р. Я., Павлишенко Б. М. Рекомбінаційний механізм ефекту підсилення динамічної тензочутливості напівпровідників при фотозбудженні // Укр. фіз. журн. 1995. Т. 40. № 7. С. 723–726.
2. Стахіра Й. М., Шувар Р. Я., Павлишенко Б. М., Савчин В. П. Вплив фотозбудження на п'єзореzистивні властивості напівпровідників // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз. 1993. Вип. 26. С. 89–93.
3. Лашкарев В. Е., Любченко А. В., Шейнкман М. К. Неравновесные процессы в фотополупроводниках. Киев: Наук. думка, 1981.

### FREQUENCY CHARACTERISTICS OF RECOMBINATIONAL MECHANISM OF PIEZOPHOTORESISTIVE EFFECT IN SEMICONDUCTORS

**B. Pavlyshenko, R. Shuvar**

*Ivan Franko Lviv National University,  
Dragomanova Str., 50, Lviv, UA-79005 Ukraine*

The frequency characteristics of recombinational mechanism of piezophotorezistive effect with linear approximation in the range of stationary photoexitation have been analysed. Asymptotical approximations and numerical modelling results are given.

*Key words:* piezophotorezistive effect, recombination, frequency characteristics.

Стаття надійшла до редколегії 31.10.2003

Прийнята до друку 12.05.2004