

ГЕНЕРАЦІЙНА ТА РЕКОМБІНАЦІЙНА СКЛАДОВІ ПРОВІДНОСТІ ФОТОДЕФОРМАЦІЙНОГО ВІДГУКУ НАПІВПРОВІДНИКА

Й. М. Стахіра, Л. С. Демків, Б. М. Павлишенко, Р. Я. Шувар
Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Драгоманова, 50, Львів, 79005, Україна
(Отримано 7 липня 2004 р.)

Методами теоретичного аналізу та чисельного моделювання проведено аналіз генераційного та рекомбінаційного механізмів виникнення п'єзофоторезистивного ефекту. Отримані результати показують можливість виникнення в певних умовах лише одного з механізмів п'єзофоторезистивного ефекту, що є важливим для реалізації фотодеформаційних методів модуляційної спектроскопії.

Ключові слова: п'єзофоторезистивний ефект, модуляційна спектроскопія.

PACS number(s): 72.20.Jv, 42.50.Md.

В умовах спільної дії на напівпровідниковий кристал стаціонарного фотозбудження та змінної механічної деформації може виникати п'єзофоторезистивний ефект (ПФРЕ), який полягає в підсиленні фотозбудженням змінної складової провідності відгуку напівпровідника на змінну деформацію [1–3]. Можливі механізми виникнення цього ефекту можуть бути зумовлені впливом деформації на темпи генерації та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду. Вивчення цих механізмів є перспективним з погляду створення нових приладів функціональної електроніки та методів модуляційної спектроскопії для дослідження структури зон вільних носіїв та локальних рівнів у забороненій зоні [4,5].

У цій праці методами теоретичного аналізу та чисельного моделювання проведено аналіз генераційного та рекомбінаційного механізмів виникнення ПФРЕ.

У межах теорії рекомбінації Шоклі-Ріда-Хола рівняння неперервності запишемо у вигляді [6]:

$$\frac{dn}{dt} = G + C_{nr}N_r n_1 - C_{nr}P_r n, \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = G + C_{pr}P_r p_1 - C_{pr}N_r p.$$

Ці рівняння доповнено рівнянням електронейтральності.

$$(p - p_0) + (P_r - P_r^0) = (n - n_0), \quad (2)$$

де

$$\begin{aligned} n_1 &= N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_r}{kT}\right], \\ p_1 &= N_v \exp\left[-\frac{E_r - E_v}{kT}\right], \\ N_r + P_r &= M_r, \end{aligned} \quad (3)$$

n, p — концентрації вільних електронів та дірок; C_{nr}, C_{pr} — коефіцієнти захоплення електронів та дірок на рекомбінаційний рівень; N_r, P_r — концентрації електронів та дірок локалізованих на рекомбінаційних центрах; M_r — концентрація рекомбінаційних центрів; G — темп оптичної генерації нерівноважних носіїв заряду; n_1, p_1 — ефективні густини станів, зведені до рекомбінаційного рівня; N_c, N_v — ефективні густини станів у зоні провідності та у валентній зоні відповідно; E_c, E_v, E_r — енергетичне положення зони провідності, валентної зони та рекомбінаційного рівня; p_0, n_0, P_r^0 — рівноважні концентрації носіїв заряду. Вплив змінної деформації на зонну структуру опишемо феноменологічно, вважаючи, що деформація модулює енергетичне положення країв зон E_c, E_v та рекомбінаційних рівнів E_r :

$$E_{c,v,r}(t) = E_{c,v,r} + \Delta E_{c,v,r} \cdot \sin(\omega t), \quad (4)$$

де ω — частота змінної деформації, $\Delta E_{c,v,r}$ — амплітуди змінної деформації країв зон вільних носіїв та рекомбінаційного рівня. Темп оптичної генерації розглянемо у вигляді

$$G(t) = G + \Delta g \cdot \sin(\omega t), \quad (5)$$

де Δg — змінна складова темпу оптичної генерації, зумовлена впливом змінної деформації.

Аналіз рівнянь неперервності проведено за першою гармонікою методом комплексних амплітуд в околі стаціонарного фотозбудження в лінійному наближенні за тензором деформації. У встановленому квазістаціонарному режимі часова залежність концентрацій електронів та дірок є такою:

$$n(t) = n_s + \Delta n \cdot \exp(i\omega t), \quad (6)$$

$$p(t) = p_s + \Delta p \cdot \exp(i\omega t),$$

де n_s, p_s — стаціонарні складові нерівноважних носіїв заряду; $\Delta n, \Delta p$ — комплексні амплітуди змінних складових електронів та дірок, які зумовлені впливом змінної деформації. В результаті проведеного аналізу отримано лінійні алгебраїчні рівняння для комплексних амплітуд:

$$\begin{aligned} i\omega\Delta n &= -\frac{\Delta n}{\tau_n} + \Delta g + \pi_n \\ i\omega\Delta p &= -\frac{\Delta p}{\tau_p} + \Delta g + \pi_p. \end{aligned} \quad (7)$$

Як випливає з одержаних рівнянь (7), у лінійному наближенні за малою величиною змінної деформації генераційний та рекомбінаційний механізм роблять адитивний внесок у змінну складову нерівноважних концентрацій носіїв та описуються членами Δg та π_n, π_p відповідно. Розгляньмо окремо кожен із цих механізмів.

Генераційний член $G(t)$ та його складова Δg записані за допомогою отриманих в адіабатичному наближенні з нестационарного рівняння Шредингера, гамільтоніан якого є сумою незбуреного гамільтоніана системи та двох операторів періодичних збурень — високо- й низькочастотного, ймовірностей переходу між двома нестационарними рівнями дворівневої квантової системи $W(t)$ [7]. У такій системі відбувається квазірезонансна взаємодія електромагнетного випромінювання (високо- й низькочастотне збурення) з нестационарними рівнями, енергетичне положення яких змінюється в часі за гармонічним законом у результаті впливу низькочастотного збурення. Причому максимальне зміщення першого енергетичного рівня з положення рівноваги, внаслідок впливу низькочастотного збурення, є іншим, ніж відповідне зміщення другого енергетичного рівня, тому енергетична відстань між рівнями змінюється за законом $\Delta E \sin \omega t$, де ΔE характеризує величину різниці реакцій рівнів на низькочастотний вплив. Саме такі збурення використовують при дослідженні й реалізації ПФРЕ в напівпровідниках.

Спектральна залежність швидкості зміни концентрації носіїв чи темпу оптичної генерації в кристалі визначається спектром коефіцієнта поглинання. Для їх обчислення використано швидкість зміни ймовірності переходу $W(t)$, враховано, що механічна деформація приводить лише до зміщення енергетичного положення рівнів і не змінює їх енергетичного розподілу. При прямих дозволених переходах для невроджених напівпровідників після інтегрування по всіх енергетичних станах отримано вирази спектрального розподілу темпу оптичної генерації в межах зон та в околі критичних точок. Нижче наведено результат для $G(t)$ в околі двомірної критичної точки:

$$G(t) = \frac{F^2 \rho_{cv}}{\sqrt{0.25}} \text{Arsh} \left[\frac{1}{F} (0.5(E_g - \omega_{cv} + \Delta E \sin \omega t)) \right], \quad (8)$$

де ω_{cv} — частота електромагнетного випромінювання, E_g — ширина забороненої зони й одночасно енергетичне положення критичної точки, ρ_{cv} — комбінована густина станів, F — характеризує енергію дипольної взаємодії електромагнетного випромінювання з парою квазірезонансних рівнів. Записавши $G(t)$ у вигляді (5) шляхом розкладу в ряд за гармоніками низькочастотного збурення, отримуємо вираз:

$$\begin{aligned} G(t) &= F^2 \rho_{cv} \text{Arsh} \left(\frac{E_g - \omega_{cv}}{2F} \right) \\ &+ \frac{0.5F \rho_{cv} \Delta E \sin \omega t}{\sqrt{1 + \left(\frac{E_g - \omega_{cv}}{2F} \right)^2}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Як випливає з наведених залежностей, змінна складова темпу оптичної генерації Δg є пропорційною до реакції системи на низькочастотне збурення. Для чисельного розрахунку характеристик ПФРЕ взято поширені значення параметрів напівпровідника: ширина забороненої зони $E_g = 0.8$ еВ; концентрація та енергетичний рівень залягання рекомбінаційних центрів $M_r = 10^{14}$ см⁻³, $E_r = 0.3$ еВ; коефіцієнти захоплення носіїв на рекомбінаційні центри $C_{nr} = 10^{-12}$ см³с⁻¹, $C_{pr} = 10^{-10}$ см³с⁻¹; амплітуда деформації енергетичного положення країв зон $\Delta E = 10^{-5}$ еВ. Перейшовши до амплітуд змінних концентрацій, вважаючи, що час життя нерівноважних носіїв $\tau = 10^{-3}$ с і $\Delta n = \Delta g \cdot \tau$, отримуємо графік спектральної залежності для амплітуд змінних концентрацій, зображених на рис. 1. У ділянці спектральної частоти фотозбудження, для якої $\hbar\omega_{cv} \gg E_g$, змінна складова генераційного механізму фотодеформаційного відгуку значно послаблюється.

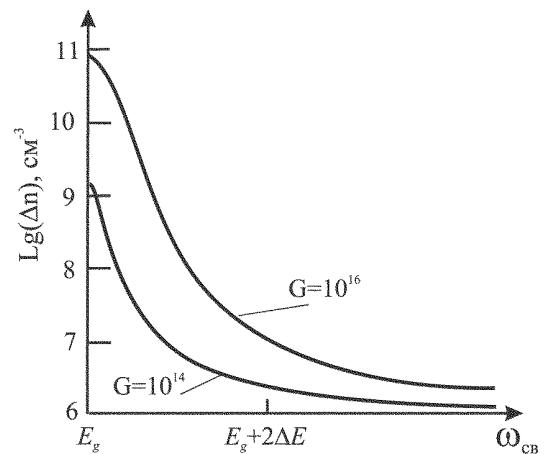


Рис. 1. Спектральна залежність для амплітуд змінних концентрацій.

Розгляньмо рекомбінаційну складову фотодеформаційного відгуку, що описується членами π_n, π_p , для яких знайдено такі вирази:

$$\pi_n = \frac{N_r(N_r + p + p_1 + i\omega C_{pr}^{-1})\Delta n_1 + P_r(n + n_1)\Delta p_1}{C_{pr}^{-1}N_r + C_{pr}^{-1}(n + n_1) + C_{nr}^{-1}(p + p_1) + (C_{nr}C_{pr})^{-1} \cdot i\omega}$$

$$\pi_p = \frac{P_r(P_r + n + n_1 + i\omega C_{nr}^{-1})\Delta p_1 + N_r(p + p_1)\Delta n_1}{C_{pr}^{-1}N_r + C_{pr}^{-1}(n + n_1) + C_{nr}^{-1}(p + p_1) + (C_{nr}C_{pr})^{-1} \cdot i\omega},$$

де

$$\Delta n_1 = -\frac{\Delta E_c - \Delta E_r}{kT} n_1, \quad \Delta p_1 = -\frac{\Delta E_r - \Delta E_v}{kT} p_1. \quad (10)$$

Змінну деформації у цій моделі враховано у множниках $\Delta n_1, \Delta p_1$. Рекombінаційний механізм ПФРЕ зумовлений модуляцією деформацією темпу термогенерації локалізованих носіїв у зони і є чутливим до концентрації локалізованих носіїв та температури кристала. Концентрація локалізованих носіїв може змінюватись під впливом стаціонарного фотозбудження внаслідок зміни стаціонарних концентрацій нерівноважних вільних носіїв. Зі зростанням стаціонарного фотозбудження стаціонарна заселеність рекомбінційного рівня виходить на насичення. При великих рівнях фотозбудження можна припустити, що

$$n \cong p \cong G\tau \gg N_r, P_r, n_1, p_1. \quad (11)$$

Для цієї умови у квазістаціонарному випадку $\omega\tau \ll 1$ отримано вирази для амплітуд змінних концентрацій у ділянці насичення стаціонарної заселеності рекомбінційного рівня

$$(\Delta n)_{\text{нас}} = (\Delta p)_{\text{нас}} = \frac{C_{nr}\Delta n_1 + C_{pr}\Delta p_1}{C_{nr} + C_{pr}}. \quad (12)$$

На рис. 2 наведено люкс-амперні характеристики рекомбінційного механізму ПФРЕ для розглянутої вище моделі напівпровідника. Як впливає з отриманих залежностей, зі зростанням темпу стаціонарної оптичної генерації нерівноважних носіїв можна досягнути значного підсилення амплітуд змінних концентрацій нерівноважних носіїв. Зі зниженням температури рекомбінційна складова ПФРЕ різко зменшується і рекомбінційний механізм ПФРЕ перестає відігравати суттєву роль у фотодеформаційному відгуку напівпровідника.

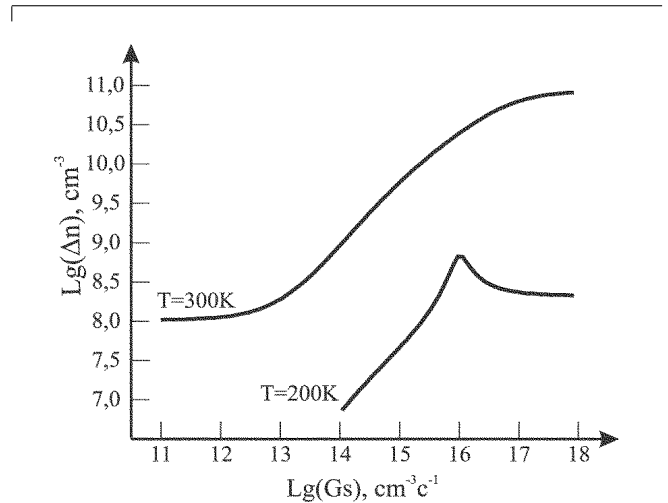


Рис. 2. Люкс-амперні характеристики амплітуд змінних концентрацій рекомбінційної складової ПФРЕ при різних температурах.

Отже, у змінну складову провідності фотодеформаційного відгуку можуть робити суттєвий внесок як генераційний, так і рекомбінційний механізми. Генераційний механізм зумовлений впливом деформації на темп оптичної генерації нерівноважних носіїв заряду. Цей механізм відіграє суттєву роль у ділянці спектра краю фундаментального поглинання і стає незначним у вищій спектральній ділянці. Рекombінаційний механізм зумовлений впливом деформації на темп термічної генерації локалізованих носіїв у зони, проявляється в ділянці спектра фундаментального поглинання і стає несуттєвим у ділянці низьких температур. Отримані результати показують можливість виникнення в певних умовах лише одного з механізмів ПФРЕ, що є важливим для реалізації фотодеформаційних методів модуляційної спектроскопії при дослідженні зонної структури напівпровідникових кристалів та енергетичної структури локальних рівнів у забороненій зоні.

[1] Г. Д. Гусейнов, Г. Б. Абдулаев, Докл. Акад. Наук СССР **206**, 1052 (1973).
 [2] A. Mahapatra, P. G. Kornreich, S. T. Kowel, Phys. Rev.

В **18**, 2766 (1978).
 [3] Й. М. Стахіра, Р. Я. Шувар, Б. М. Павлишенко, Укр. фіз. журн. **40**, 723 (1995).

- [4] H. Nalto, T. Iwai, M. Okuda, Meas. Sci. Technol. № 2, 912 (1991). *Неравновесные процессы в фотополупроводниках* (Наук. думка, Киев, 1981).
- [5] H. Mathieu, J. Allégre, B. Gil, Phys. Rev. B **43**, 2218 (1991). [7] Й. М. Стахіра, Л. С. Демків, Укр. фіз. журн. **45**, 1240 (2000).
- [6] В. Е. Лашкарев, А. В. Любченко, М. К. Шейнкман,

GENERATION AND RECOMBINATION CONDUCTIVITY COMPONENTS OF THE SEMICONDUCTOR'S PHOTODEFORMATIONAL RESPONSE

J. M. Stakhira, L. S. Demkiv, B. M. Pavlyshenko, R. Ya. Shuvar
*Ivan Franko Lviv National University of Lviv, Department for Physics of Semiconductors
50 Drahomanov St., Lviv, UA-79005, Ukraine*

Generational and recombinational mechanisms of the piezophotorestrictive effect were studied by theoretical and numerical methods. Obtained results show that in certain conditions only one of the mechanisms of the piezophotorestrictive effect can appear that is important for photodeformational methods of modulatory spectroscopy.