

ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ  
БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE  
BASES OF SENSORS

---

---

PACS number(s): 72.20.Jv.

УДК 621.315.592

ДИНАМІКА ВЗАЄМОДІЇ НОСІЇВ ЗАРЯДУ  
З ЦЕНТРАМИ ПРИЛИПАННЯ ПРИ ФОТОДЕФОРМАЦІЙНОМУ  
ЗБУДЖЕННІ НАПІВПРОВІДНИКА

*Б. М. Павлишенко, Р. Я. Шувар*

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

**Анотація**

ДИНАМІКА ВЗАЄМОДІЇ НОСІЇВ ЗАРЯДУ З ЦЕНТРАМИ ПРИЛИПАННЯ  
ПРИ ФОТОДЕФОРМАЦІЙНОМУ ЗБУДЖЕННІ НАПІВПРОВІДНИКА

*Б. М. Павлишенко, Р. Я. Шувар*

Досліджується динаміка нерівноважних носіїв заряду при наявності центрів прилипання в умовах спільної дії на напівпровідник стаціонарного фотозбудження та змінної деформації.

**Ключові слова:** п'єзофоторезистивний ефект, центри прилипання, сенсори тиску.

**Abstract**

THE DYNAMIC OF CHARGE CARRIERS INTERACTION WITH TRAPPING CENTERS UNDER  
PHOTODEFORMATIONAL EXCITATION OF SEMICONDUCTOR

*B. M. Pavlyshenko, R. Ya. Shuvar*

The dynamic of nonequilibrium charge carriers, involving trapping centers, in conditions of joint action the stationary light excitation and alternate deformation on semiconductor is investigated.

**Key words:** piezophotoreisitive effect, trapping centers, pressure sensors.

**Аннотация**

**ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА С ЦЕНТРАМИ ПРИЛИПАНИЯ ПРИ ФОТОДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКА**

*Б. М. Павлишенко, Р. Я. Шувар*

Исследуется динамика неравновесных носителей заряда при наличии центров прилипания в условиях совместного воздействия на полупроводник стационарного фотовозбуждения и переменной деформации.

**Ключевые слова:** пьезофоторезистивный эффект, центры прилипания, сенсоры давления.

В умовах спільного збудження напівпровідника світлом з області спектру власного поглинання та змінної деформації виникає п'єзофоторезистивний ефект (ПФРЕ), який полягає у підсиленні фотозбудженням змінної складової провідності відгуку напівпровідника на змінну деформацію. У роботах [1,2] показано, що в напівпровідниках з простою структурою зон в умовах просторово однорідного фотозбудження одним з механізмів виникнення ПФРЕ є рекомбінаційний механізм ПФРЕ, який визначається впливом змінної деформації на темп термічної генерації носіїв з локальних рівнів у зону провідності та у валентну зону. Даний ефект є перспективним з точки зору створення нових приладів функціональної електроніки, зокрема, сенсорів змінного тиску із керованою світлом тензочутливістю.

У даній роботі досліджується динаміка нерівноважних носіїв заряду при наявності центрів прилипания в умовах спільної дії на напівпровідниковий кристал стаціонарного фотозбудження та змінної деформації. Для дослідження впливу центрів прилипания на частотні характеристики п'єзофоторезистивного відгуку розглянемо систему рівнянь неперервності, яка описує динаміку обміну носіями між зоною провідності та рівнем прилипания в наближенні часу життя нерівноважних фотоносіїв:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= G - \frac{n - n_o}{\tau_r} - C_m P_t n + C_m N_t n_{lt}, \\ \frac{dN_t}{dt} &= C_m P_t n - C_m N_t n_{lt}, \quad N_t + P_t = M_t, \\ n_{lt} &= N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_t}{kT}\right], \quad p_{lt} = N_v \exp\left[-\frac{E_t - E_v}{kT}\right], \end{aligned} \quad (1)$$

де  $G$  — темп оптичної генерації нерівноважних носіїв заряду;  $\tau_r$  — час життя нерівноваж-

них носіїв;  $C_m$  — коефіцієнт захоплення електронів та дірок на центри прилипания;  $N_t, P_t$  — концентрації електронів та дірок локалізованих на центрах прилипания;  $M_t$  — концентрація центрів прилипания;  $n_{lt}, p_{lt}$  — ефективні густини станів, зведені до рівня прилипания;  $E_c, E_v, E_t$  — енергетичне положення зони провідності, валентної зони та рекомбінаційного рівня;  $N_c, N_v$  — ефективні густини станів в зоні провідності та у валентній зоні відповідно.

У моделі, що описується рівняннями (1) вважається, що час життя нерівноважних носіїв  $\tau_r$  є більшим ніж характерний час обміну носіями між зоною провідності та рівнем прилипания. В цьому наближенні при частотах деформації  $\omega$ , для яких виконується умова  $\omega \tau_r \gg 1$ , впливом дірок через рекомбінаційний канал на динаміку обміну носіями між зоною провідності та рівнем прилипания можна знехтувати. Це дає змогу виділити частотний вплив фактору прилипания у чистому вигляді, нехтуючи впливом центрів прилипания через умову електронейтральності. Вплив деформації враховується феноменологічно через модуляцію енергетичного положення краю зони провідності

$$E_c(t) = E_c + \Delta E_c \cdot \cos(\omega t), \quad (2)$$

де  $\omega$  — частота змінної деформації,  $\Delta E_c$  — амплітуда змінної деформації енергетичного положення краю зони провідності.

Фотозбудження враховується через темп оптичної генерації нерівноважних носіїв. Для подальшого аналізу проведемо лінеаризацію системи рівнянь (1) в околі стаціонарного фотозбудження в лінійному наближенні по малій величині деформації. Лінеаризовані рівняння набудуть наступного вигляду:

$$\frac{d\tilde{n}}{dt} = \tilde{g} - \left[ \frac{1}{\tau_r} + C_m P_t \right] \cdot \tilde{n} + \frac{\tilde{N}_t}{\tau_r} + C_m N_t \tilde{n}_{lt},$$

$$\frac{d\tilde{N}_t}{dt} = -\frac{\tilde{N}_t}{\tau_t} + C_m P_t \tilde{n} - C_m N_t \tilde{n}_t, \quad (3)$$

$$\tau_t = \frac{1}{C_m (n + n_t)},$$

де  $\tilde{g}, \tilde{N}_t, \tilde{n}, \tilde{n}_t$  — змінні складові величин,  $\tau_t$  — характерний час релаксації концентрацій локалізованих на пастках носіїв.

Вплив змінної деформації проявляється у виникненні змінної складової  $\tilde{n}_t$  внаслідок модуляції енергетичного положення краю зони провідності. Амплітуда змінної складової  $\tilde{n}_t$  визначається лінійним наближенням по амплітуді змінної деформації енергетичного положення краю зони провідності  $\Delta E_c$

$$\Delta n_t = -\frac{\Delta E_c}{kT} n_t. \quad (4)$$

Розглядаючи встановлений режим і розв'язуючи рівняння (3) методом комплексних амплітуд отримаємо вираз для комплексної амплітуди змінних концентрацій електронів:

$$\Delta n_t(\omega) = \frac{\Delta g \left[ 1 - i \frac{1}{\omega \tau_t} \right] + C_m N_t \Delta n_t}{\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_t} + C_m P_t + i \left[ \omega - \frac{1}{\omega \cdot \tau_r \tau_t} \right]}, \quad (5)$$

де  $\Delta g$  — амплітуда змінної складової темпу оптичної генерації, що визначає генераційний механізм ПФРЕ, який проявляється при фотозбудженні світлом із області спектру краю власного поглинання;  $\omega$  — частота змінної деформації.

Генераційною складовою  $\Delta g$  знехтуємо, вважаючи, що спектр збуджуючого світла далекий від краю поглинання. В подальшому аналізі розглянемо лише складову, зумовлену наявністю центрів прилипання. Як випливає з аналізу виразу (5) частотні характеристики амплітуди  $\Delta n_t$  мають резонансний характер з частотою резонансу

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{\tau_r \tau_t}}. \quad (6)$$

При динамічній деформації кристалу з частотою  $\omega_o$ , як випливає з виразу (5), фазовий зсув між змінною складовою концентрацій, зумовленою фактором прилипання та змінним тиском рівний нулю, оскільки при частоті  $\omega_o$  зни-

кає уявна складова комплексної амплітуди  $\Delta n_t$ , що являється умовою резонансу [3]. Модуль та аргумент комплексної амплітуди  $\Delta n_t$ , якими описуються амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики складової фактору прилипання механізму, знайдемо з виразу (5)

$$|\Delta n_t(\omega)| = \frac{C_m N_t \Delta n_t}{\sqrt{\omega^2 \left[ \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_t} + C_m P_t \right]^2 + (\omega_o^2 - \omega^2)^2}},$$

$$\varphi(\Delta n_t) = \arctg \left[ \frac{\omega \left[ \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_t} + C_m P_t \right]}{(\omega_o^2 - \omega^2)} \right]. \quad (7)$$

Нормовані резонансні характеристики можна записати, як запропоновано у роботі [3], у такому вигляді

$$\phi(\omega) = \frac{|\Delta n(\omega)|}{|\Delta n(\omega_o)|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma^2 \cdot Q_o^2 \cdot (1 - \gamma^{-2})^2}}, \quad (8)$$

де  $\gamma = \frac{\omega}{\omega_o}$ ,  $Q_o = \left[ \sqrt{\frac{\tau_r}{\tau_t}} + \sqrt{\frac{\tau_t}{\tau_r}} + \sqrt{\tau_r \tau_t} \cdot C_m P_t \right]^{-1}$ .

Функція  $Q_o$  характеризує добротність коливної системи, утвореної зоною провідності та рівнем прилипання електронів. Враховуючи, що для більшості напівпровідників виконується умова  $\tau_t \ll \tau_r$  і з ростом фотозбудження, концентрація локалізованих на пастках дірок суттєво зменшується, знайдемо простий вираз для добротності

$$Q_o = \sqrt{\frac{\tau_t}{\tau_r}}. \quad (9)$$

Під впливом фотозбудження, внаслідок оптичної залежності характерних часів  $\tau_r$ ,  $\tau_t$  змінюються величини параметрів  $\omega_o$ ,  $Q_o$ , якими характеризуються резонансні властивості впливу фактору прилипання на п'єзофоторезистивний відгук. На рис. 1,2 наведено результати чисельних розрахунків відносної зміни резонансної частоти  $\omega_o/\omega_{oc}$  ( $\omega_{oc}$  — резонансна частота при відсутності фотозбудження), та добротності  $Q_o$  від параметру нерівноважності  $\xi$ , який визначається наступним виразом:

$$\xi = \frac{F_n - F_p}{E_g}, \quad (10)$$

де  $F_n, F_p$  — квазірівні Фермі,  $E_g$  — ширина забороненої зони.

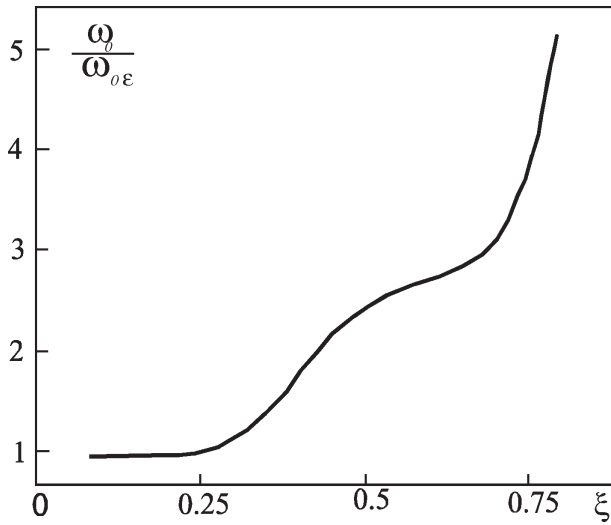


Рис. 1 Залежність відносної зміни резонансної частоти  $\omega_0$  від параметра оптичної нерівноважності  $\xi$ .

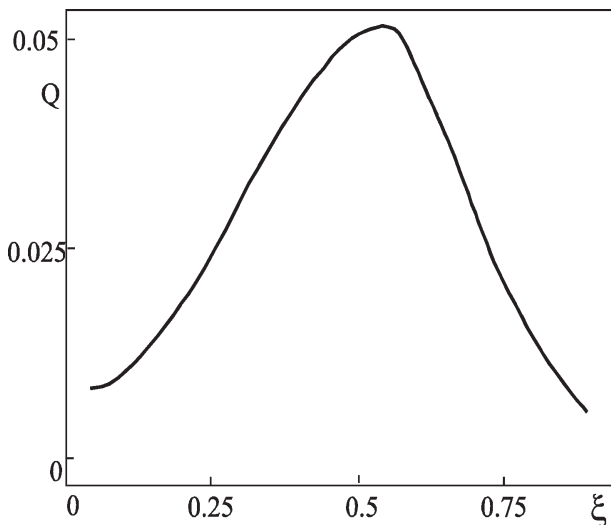


Рис. 2 Залежність добротності  $Q$  від параметра оптичної нерівноважності  $\xi$ .

Основні параметри напівпровідника для чисельних розрахунків приймалися такими: ширина забороненої зони  $E_g=0.8\text{eV}$ ; глибина залягання рекомбінаційного рівня  $E_r=0.5\text{eV}$ ; коефіцієнти захоплення носіїв на рекомбінаційні центри —  $C_{nr}=10^{-10}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ ;  $C_{pr}=10^{-9}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ ; концентрація та глибина залягання центрів прилипання —  $M_t=10^{16}\text{cm}^{-3}$ ;  $E_t=0.2\text{eV}$ ; коефіцієнт захоплення носіїв на центри прилипан-

ня —  $C_{nt}=10^{-11}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ ; амплітуда деформації енергетичного положення країв зон  $\Delta E_c=10^{-6}\text{eV}$ ; температура кристалу  $T=300\text{K}$ . Стационарні значення величин  $\tau_r, N_r, P_r$ , які входять як параметри у вирази (5)-(8) знаходились шляхом чисельного розв'язку рівнянь неперервності для носіїв заряду в зонах та на локальних рівнях [1,2] в умовах стаціонарного фотозбудження. Як впливає з наведених на рис. 1,2 кривих, за допомогою фотозбудження можна суттєво змінювати параметри взаємодії динаміки нерівноважних фотоносіїв заряду з центрами прилипання в умовах змінної деформації напівпровідника. У реальних напівпровідниках час життя нерівноважних носіїв заряду та час релаксації концентрації локалізованих на центрах прилипання носіїв можуть суттєво відрізнятись. Це дає змогу реалізувати стабілізацію частотної характеристики п'єзофоторезистивного відгуку в широкому інтервалі частот, для яких виконується умова  $\tau_r^{-1} < \omega < \tau_t^{-1}$  внаслідок виникнення широкого плато на резонансній кривій зумовленого низькою добротністю  $Q$  розглянутої коливної системи. Аналіз, проведений при наявності лише одного рекомбінаційного рівня без фактору прилипання, показав, що з ростом частоти деформації, для якої виконується умова  $\omega > \tau_r^{-1}$  амплітуда змінних складових концентрацій вільних носіїв починає різко падати, а її частотна залежність описується множником  $[1+i\omega\tau(G)]^{-1}$ . Отже, введення центрів прилипання суттєво впливає на частотні характеристики ПФРЕ, параметрами цих характеристик можна керувати з допомогою стаціонарного фотозбудження.

### Список літератури

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'єзорезистивні властивості напівпровідників // Вісник Львівського університету: сер. фізична. Вип 26, 1993р. — С. 89-93.
3. Мигулин В. В., Медведєв В. И., Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Основы теории колебаний. — М.: Гл. ред. физ. — мат. лит., 1988. — 392с.