

НЕГАТИВНА ФОТОПРОВІДНІСТЬ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Грабіщенко Я.О, Бабиченко О.Ю

e-mail: yaroslav.hrabishchenko@nure.ua oksana.babychenko@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП
м. Харків, Україна

This work examines negative photoconductivity in heterogeneous semiconductor structures formed by a crystalline matrix with cylindrical amorphous inclusions. Unlike conventional photoconductivity, the effect appears as a decrease in conductivity under illumination. It is attributed to trapping of photogenerated carriers at surface and interfacial states, which induces carrier depletion near the interface. The model predicts progressive recovery of photoconductivity with increasing distance from the interface. These results are relevant for understanding charge transport and designing advanced optoelectronic devices and sensor applications.

Фотопровідність є одним із фундаментальних явищ фізики напівпровідників і широко використовується в сучасній оптоелектроніці. У більшості напівпровідникових матеріалів під дією світла відбувається збільшення електричної провідності, що пояснюється генерацією електронно-діркових пар. Однак у деяких напівпровідникових матеріалах та гетероструктурах спостерігає протилежний ефект – **негативна фотопровідність**, коли під дією освітлення провідність матеріалу зменшується порівняно з темновим значенням [1-2].

Метою роботи є дослідження негативної фотопровідності в гетерогенних напівпровідникових структурах та встановлення впливу поверхневих і міжфазних пасток на фотопровідність.

Подібний ефект спостерігається в різних типах напівпровідникових матеріалів, зокрема в кремнієвих структурах, вузькозонних і оксидних напівпровідниках та наноструктурованих матеріалах. Негативна фотопровідність виникає внаслідок взаємодії кількох механізмів переносу заряду - захоплення носіїв на дефектних і поверхневих рівнях, перерозподілу заряду між фазами гетероструктури та зміни вигину енергетичних зон. Поверхневі стани формують додаткові рівні в забороненій зоні й впливають на положення рівня Фермі [3]. У реальних структурах порушення періодичності кристалічної ґратки на поверхні призводить до появи поверхневих станів, які захоплюють носії заряду та змінюють електростатичний потенціал у приповерхневій області. Це викликає вигин енергетичних зон і може формувати області збіднення або накопичення носіїв, що істотно впливає на електричні властивості тонкоплівкових і гетерогенних структур [4]. Накопичення заряду на поверхневих або міжфазних пастках змінює потенціальний профіль і може призводити до формування інверсного вигину зон. У

результаті виникає потенціальний бар'єр, який зменшує концентрацію вільних носіїв у провідному каналі та спричиняє зниження електричної провідності структури [5].

В роботі досліджується виникнення негативної фотопровідності в гетерогенних напівпровідникових структурах типу кристалічна матриця з аморфними включеннями циліндричної форми. Для визначення фотопровідності подібної симетричної структури просторовий розподіл концентрації фотоносіїв Δn описується наступним диференціальним рівнянням:

$$\frac{\delta \Delta n}{dt} = D_n \frac{\delta^2 \Delta n}{\delta x^2} - \frac{\Delta n}{\tau_n} + G \cdot \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

де Δn – концентрація надлишкових електронів; D_n – коефіцієнт дифузії; τ_n – час життя носіїв заряду; α – коефіцієнт поглинання.

Для вирішення рівняння (1) використовуються наступні граничні умови:

$$D \frac{\delta \Delta n}{\delta x} \Big|_{x=r} = +G \cdot \Delta n(r), \quad D \frac{\delta \Delta n}{\delta x} \Big|_{x=l} = -G \cdot \Delta n(l). \quad (2)$$

На рисунку 1 наведено розраховані залежності відносної зміни фотопровідності. Криві 1-4 відповідають різним параметрам структури.

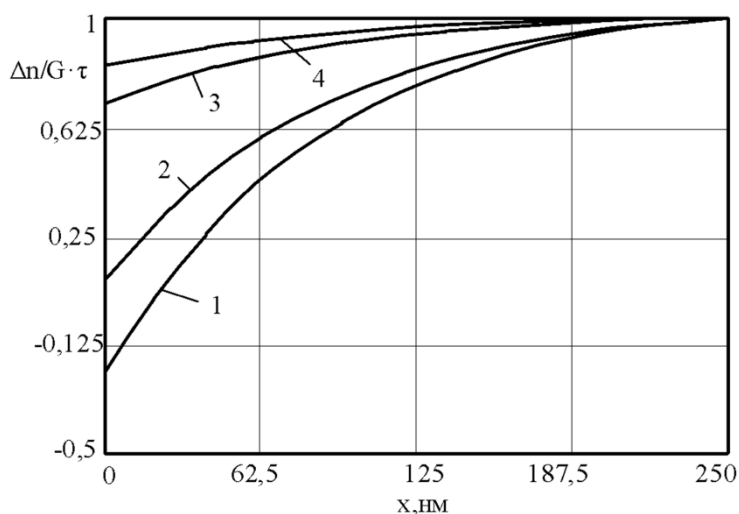


Рисунок 1 – Залежність відносної зміни фотопровідності для відстані між аморфними включеннями 500нм

Від'ємні значення відносної зміни фотопровідності пояснюються захопленням фотогенерованих носіїв заряду на поверхневих або міжфазних пастках. Унаслідок цього зменшується концентрація вільних носіїв, які беруть участь у переносі заряду. Одночасно накопичення заряду на пастках призводить до зміни електростатичного потенціалу та посилення вигину енергетичних зон у приповерхневій області. У результаті формується область збіднення носіями заряду, що зменшує електропровідність структури.

По мірі наближення до центру циліндра зміна фотопровідності збільшується і для всіх кривих наближається до одиниці. Це означає, що вплив поверхневих пасток і дефектних рівнів поступово зменшується, а фотогенерація носіїв починає переважати процеси їх захоплення. У глибших шарах матеріалу концентрація фотогеноерованих носіїв визначається переважно об'ємними процесами генерації та рекомбінації. Саме тому фотопровідність поступово відновлюється і наближається до стаціонарного значення.

Дослідження негативної фотопровідності має важливе значення для розуміння фізики транспортних процесів у напівпровідникових гетероструктурах. Зокрема, контроль концентрації поверхневих станів і дефектів дозволяє керувати фоточутливістю матеріалу та змінювати характер фотопровідності. Це відкриває нові можливості для створення фоточутливих елементів, оптичних сенсорів та інших оптоелектронних пристроїв нового покоління.

Таким чином, проведений аналіз розрахункових характеристик показує, що негативна фотопровідність у напівпровідникових структурах може виникати внаслідок захоплення фотогеноерованих носіїв заряду на поверхневих або міжфазних рівнях. У приповерхневій області ці процеси призводять до зменшення концентрації вільних носіїв та формування області збіднення. Зі збільшенням відстані від поверхні вплив поверхневих пасток зменшується, і фотопровідність структури поступово відновлюється. Отримані результати добре узгоджуються з сучасними теоретичними моделями фотопровідності в неоднорідних напівпровідникових системах.

Список використаних джерел:

1. Negative Photoconductivity: Bizarre Physics in Semiconductors. URL: https://www.researchgate.net/publication/364616632_Negative_Photoconductivity_Bizarre_Physics_in_Semiconductors (date of access: 12.03.2026).
2. O.Y Babychenko, AG Pashchenko - Kinetics of photoconductivity of c-si with amorphous inhomogeneities / Telecommunications and Radio Engineering, Volume 77, Issue 2, 2018, pp. 161-171
3. A reversible positive and negative photoconductivity behavior modulated by polarization effect. URL: https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/125/24/241106/3324888/A-reversible-positive-and-negative?redirectedFrom=fulltext&utm_source (date of access: 12.03.2026).
4. O. Babychenko et al., J. Nano- Electron. Phys. 16 No 1, 01013 (2024) [https://doi.org/10.21272/jnep.16\(1\).01013](https://doi.org/10.21272/jnep.16(1).01013)
5. O Yu Babychenko, AG Pashchenko / States density distribution for determination of a-Si: H photoconductivity / J. Nano- Electron. Phys. vol. 9 No 5, 05044(4pp) (2017)