

УДК 535.215.4; 535.34; 535.37

Кондратенко С.В.¹, к.ф.-м.н., доц.,
Козирев Ю.М.², к.ф.м.н., с.н.с.,
Сторожук Д.П.¹, студент

Вплив наноострівців SiGe на процеси рекомбінації в гетероструктурах Si/Ge з наноострівцями SiGe

Для вивчення процесів рекомбінації досліджено спектральні та часові залежності позовжньої фотопровідності наногетероструктур Si/Ge з наноострівцями SiGe, отриманих методом молекулярно-променевої епітаксії. Фотопровідність при $T < 190$ K, в спектральній області, де Si є прозорим, зумовлена переходами за участю локалізованих станів наноострівців SiGe. Показано, що при зниженні температури найбільш суттєвим виявилось зменшення фотопровідності в області фундаментального поглинання наноострівців. Це свідчить про високу ефективність центрів рекомбінації електрон-діркових пар в SiGe наноострівцях.

Ключові слова: фотопровідність, рекомбінація, наноострівці.

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, пр-т. Глушкова 4, Київ, 03127,
e-mail: kondr@univ.kiev.ua

² Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України, вул. Генерала Наумова, 17, Київ, 03164
e-mail: mruby@ukr.net

Статтю представив член-кор. НАН України, д.ф.-м.н., проф. Макара В.А.

Вступ

Цікавість до напівпровідникових гетероструктур з нанорозмірними об'єктами зумовлена ефектами розмірного квантування, які призводять до зміни електронного спектру. Дослідження наноструктур SiGe/Si відкривають можливості для розробки нових принципів побудови приладів нано- та оптоелектроніки, таких як детекторів середнього ІЧ та дальнього ІЧ діапазону, фотодіодів, систем пам'яті, лазерів та ін[1-5].

Гетероструктури SiGe/Si відносять до другого типу, де існує обмеження руху носіїв заряду одного знаку – дірок в валентній зоні. В гетероструктурах Ge/Si з квантовими точками

S. V. Kondratenko¹, PhD,
Yu.N. Kozyrev², Sen. Sci. Res.,
D. P. Storozhuk¹, stud.

Effect of SiGe nanoislands on recombination processes in heterostructures Si/Ge with SiGe nanoislands

To research the recombination processes Spectral and time dependences of lateral photoconductivity nanoheterostructures Si/Ge with SiGe nanoislands, obtained by molecular beam epitaxy were studied. Photoconductivity at $T < 190$ K, in the spectral region where Si is transparent, is conditioned due to transitions involving localized states nanoislands SiGe. It is shown that when the temperature was decreased the most significant is the decrease in the photoconductivity of the fundamental absorption of nanoislands. This shows the high efficiency of recombination centers of electron-hole pairs in SiGe nanoislands.

Key Words: photoconductivity, recombination, nanoislands.

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, faculty of physics 03127, Kyiv, Glushkova st. 4,
e-mail: kondr@univ.kiev.ua

² Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine, 17 General Naumov Str., Kyiv, 03164,
e-mail: mruby@ukr.net

SiGe відбувається просторове розділення нерівноважних носіїв заряду – дірки захоплюються станами валентної зони SiGe, а електрони накопичуються в потенціальній ямі кремнієвого оточення Si. Як наслідок, квантові точки SiGe за низьких температур здатні накопичувати додатний заряд. За таких умов, присутність наноострівців SiGe на поверхні підкладки c-Si або розташування їх всередині півки Si має вплинути на перерозподіл густини заряду вздовж епітаксціальних шарів, що в свою чергу вплине на процеси рекомбінації носіїв заряду.

Для вивчення процесів фотогенерації та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в

наногетероструктурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ досліджувались спектральні та часові залежності поздовжньої фотопровідності.

Методика експерименту

Багатошарові Ge/Si гетероструктури з наноострівцями SiGe були вирощені методом молекулярно-променевої епітаксії [6,7] на підкладках Si (100) p-типу, легованих В, з питомим опором 7.5 Ом·см. На підкладці Si спочатку вирощувався буферний шар Si товщиною 100 нм, який легувався В з концентрацією 10^{16} см^{-3} . Домішки цієї ж концентрації були в Si підкладці. Для створення р-і-n структури вирощувались КТ Ge, висотою 2 нм, при температурі 500 °С. Швидкість осадження складала 1.0 нм/хв для Si і 0.6 нм/хв для Ge. Після шару КТ вирощувався шар Si спейсера до моменту спостереження високо контрастної $\text{Si}(100)2 \times 1$ картини дифракції електронів, яка є типовою для Si. Період структури, яка складалася із шару КТ і шару Si спейсера, був рівний 5. Останній шар КТ закривався шаром Si, товщиною 20 нм, який легувався Sb з концентрацією 10^{16} см^{-3} . Таким чином, вирощувались n-p структури з КТ в області потенціального бар'єру. В 19-ти шаровій гетероструктурі період складався з квантових точок $\text{Si}_{0.38}\text{Ge}_{0.62}$, висотою 1.1 нм і шарів Si, товщиною 5 нм.

Вимірювання спектральних залежностей фотопровідності проводились на базі стандартного інфрачервоного спектрометра ИКС-12 в спектральному інтервалі 0,6–1,4 еВ з використанням випромінювання галогенової лампи накалювання потужністю 250 Вт.

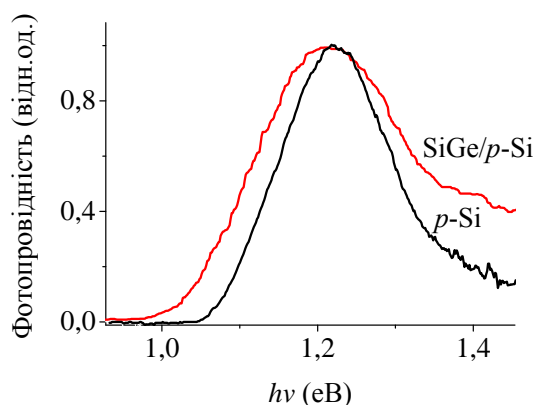


Рис. 1. Спектри поздовжньої фотопровідності при 290 К багатошарової гетероструктури з 19 шарами наноострівців SiGe висотою 2 нм та без наноострівців

Частота модуляції збуджуючого випромінювання складала 80 Гц. Для вимірювання фотоструму чи фото-ЕРС використовувався селективний підсилювач із синхронним детектуванням. Спектральні залежності приводились до постійного числа квантів з використанням неселективного піроелектричного приймача.

Результати та їх обговорення

Спектральні залежності поздовжньої фотопровідності структури Ge/Si з 19 шарами квантових точок наведено на рис. 1. Спектри виміряно при кімнатній температурі та модуляції збуджувального випромінювання з частотою 80 Гц. Фотострум з граничною енергією квантів збуджувального випромінювання $h\nu_{\text{гр}} > 1.0 \text{ eV}$ зумовлений міжзонними переходами в Si. Для порівняння за аналогічних умов було також проведено виміри поздовжньої фотопровідності зразка p-Si, який не містив SiGe наноострівців. Форма спектра фотопровідності багатошарової структури з наноострівцями вказує на невелику ($\sim 10^3 \text{ см}^2/\text{с}$) величину швидкості поверхневої рекомбінації при 290 К.

Слід звернути увагу на відмінність форми отриманих спектральних залежностей, яка

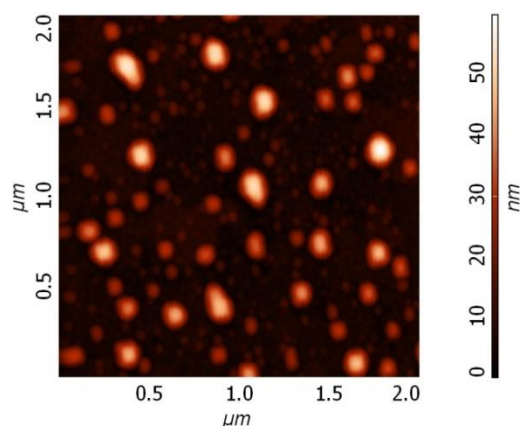


Рис. 2. АСМ зображення поверхні з наноострівцями Ge, вирощеними методом МПЕ при 500 °С на поверхні підкладки p-Si (001) КДБ-7.5. (зразок 302.03.11)

полягала у спостереженні фотоструму при збудженні квантами з енергією $\sim 1.0 \text{ eV}$ до 1.05 еВ. Такий сигнал був відсутній при вимірюванні фотопровідності p-Si структур без шарів з наноострівцями SiGe. Як відомо, сигнал фотопровідності поблизу довгохвильового края пропорційний коефіцієнту оптичного поглинання, отже відмінність спектрів ФП зумовлена насамперед його зміною. Її можуть

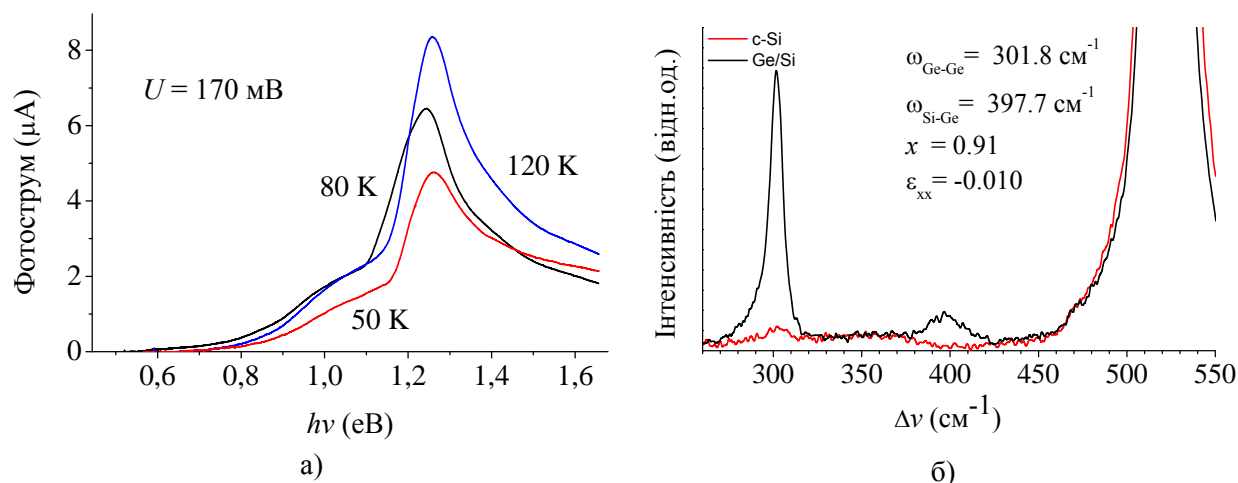


Рис. 3. Спектри поздовжньої фотопровідності (а) та спектри КРС (б) гетероструктури Si/Ge з нанострівцями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на підкладці p-Si (001) (зразок 302.03.11).

викликати неоднорідні механічні напруження в Ge/Si гетероструктурі, які максимальні в нанострівцях SiGe та їх Si оточенні. Авторами роботи [8] встановлено, що неоднорідні деформації здатні викликати помітні зміни оптичних властивостей, зумовлені зсувом електронного спектра на величину порядку 100 меВ. Розрахунки полів механічних напружень структури Ge/Si з квантовими точками Ge [9] показали, що найбільш напружена ділянка знаходиться під основою нанострівців, а величина деформації решітки кремнію вздовж площини структури зменшується при віддаленні від нанострівців. Як наслідок, зонна структура кремнієвого оточення нанострівців характеризується варіаціями в площині структури, тобто є зміннозонною. Область Si з мінімальної шириною забороненої зони, яка до того ж є меншою за ширину недеформованого c-Si, знаходиться поблизу основи нанострівців. Фотовідгук в інфрачервоній області 1.0 – 1.05 eV можна пояснити тим, що стиснені області Si поблизу нанострівців мають меншу ширину забороненої зони у порівнянні з недеформованою Si матрицею. Крім того, локальні електричні поля, зумовлені неоднорідністю оточення нанострівців, можуть виявитись досить сильними, внаслідок чого край фундаментального поглинання c-Si зазнає додаткового розмиття внаслідок ефекту Франца-Келдиша.

Просторове розділення електрон-діркових пар локальними полями здатне вплинути на темп рекомбінації носіїв, фотогенерованих в підкладці Si. Підтвердженням цього є менший спад в

короткохвильовій області спектра фотопровідності структури з нанострівцями (рис.1). Розглянемо основні закономірності фотопровідності на прикладі найпростішої гетеросистеми Si/Ge з нанострівцями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на підкладці p-Si (001). На рис. 2 наведено АСМ-зображення верхнього шару типового зразка із одним шаром нанострівців великого розміру та суттєвим розкидом за розмірами. З рисунку видно, що поверхня містить нанострівці із розміром основи приблизно 98 нм та висотою приблизно 15 нм. Середня поверхнева густина нанострівців складає $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$. З даних спектроскопії КРС (рис. 2) визначено вміст Ge в нанострівцях $x=0.91\pm 0.02$ та величину механічних напружень $\epsilon_{xx} = 0.01$.

Спектри фотопровідності (рис.3,а) виміряні при стаціонарному збудженні та температурах 50-80-120 К містили дві складові. При $h\nu > \epsilon_{g,\text{Si}}$ (1.16 eV при 50 К) основний внесок у фотопровідність давали електронно-діркові пари, фотозбуджені внаслідок міжзонних переходів в підкладці p-Si. В спектральній області, де Si є прозорим, фотопровідність обумовлена електронними переходами за участю локалізованих станів нанострівців $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. При зниженні температури до 120 К спостерігалась довготривала релаксація фотоструму. На рис. 4 наведені часові залежності фотоструму, виміряні після фотозбудження квантами з $h\nu = 0.8 \text{ eV}$ (а) та $h\nu = 1.4 \text{ eV}$ (б). Після припинення освітлення струм спадав за законом:

$$I = I_0 + I_{\text{PC}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

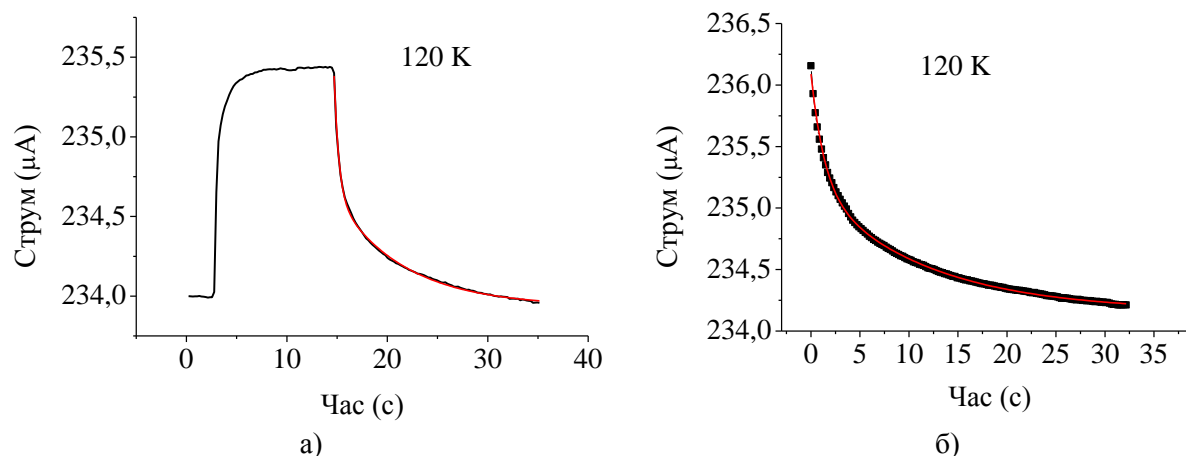


Рис. 4. Часові залежності фотоструму, виміряні після фотозбудження квантами з $h\nu = 0.8$ eV (а) та $h\nu = 1.4$ eV (б) гетероструктури Si/Ge з nanoострівцями $Si_{1-x}Ge_x$ на підкладці p-Si (001)

де I_0 та I_{PC} - величини темного струму та стаціонарного фотоструму, відповідно, а τ - час релаксації фотозбудження, який складає $\tau = 6.8 \pm 0.2$ с та $\tau = 11.6 \pm 0.2$ с при фотозбудженні квантами $h\nu = 0.8$ eV та $h\nu = 1.4$ eV, відповідно. Великі значення τ , спостережувані при низьких температурах, є наслідком просторового розділення нерівноважних електронів та дірок, що сповільнює темп їх рекомбінації. Відносно швидша релаксація при фотозбудженні квантами $h\nu = 0.8$ eV лише nanoострівців $Si_{1-x}Ge_x$ є свідченням більш ефективної рекомбінації за участю станів nanoострівців, у порівнянні з рекомбінацією в приповерхневому шарі збіднення підкладки p-Si.

Зменшенню темпу рекомбінації нерівноважних електронів та дірок фотогенерованих у підкладці Si, сприяють неоднорідне електричне поле з приповерхневого

шару збіднення p-Si. Це поле має такий напрямок, який сприяє дрейфу в напрямку до освітленої поверхні нерівноважних дірок, фотозбуджених внаслідок зона-зонних переходів в Si. В той самий час нерівноважні електрони заповнюють мінімуми потенціальної енергії поблизу поверхні. Просторове розділення нерівноважних носіїв заряду, при цьому, зменшує ймовірність рекомбінації та сповільнює кінетику фотоструму при зниженні температури. Спад в короткохвильовій області спектра фотопровідності, при $h\nu > 1.3$ eV, виявився тим більший, чим вища температура. Зазвичай зменшення фотопровідності в цій області спектра пояснюється тим, що із зростанням $h\nu$ все більша частина збуджувального випромінювання поглинається в приповерхневій області Si, де є більшим темп рекомбінації в порівнянні з об'ємом підкладки. Спостережувані зміни форми спектрів вказують на те, що темп рекомбінації носіїв заряду, фотогенерованих в приповерхневому шарі підкладки Si зменшився при охолодженні, коли просторове розділення стає більш ефективним.

Аналогічні результати спостерігались при дослідженні фотопровідності в багатошарових наногетероструктурах Si/Ge. На рис. 5 наведено спектри поздовжньої фотопровідності багатошарової Si/Ge гетероструктури з 19 шарами nanoострівців $Si_{0.38}Ge_{0.62}$, висотою 1.1 нм, розділених шарами кремнію шириною 5 нм. Виявилось, що зі зниженням температури в діапазоні 50 – 190 K величина фотопровідності зменшувалась в усьому спектральному діапазоні. Найбільшої зміни зазнала компонента фотопровідності, пов'язана з генерацією

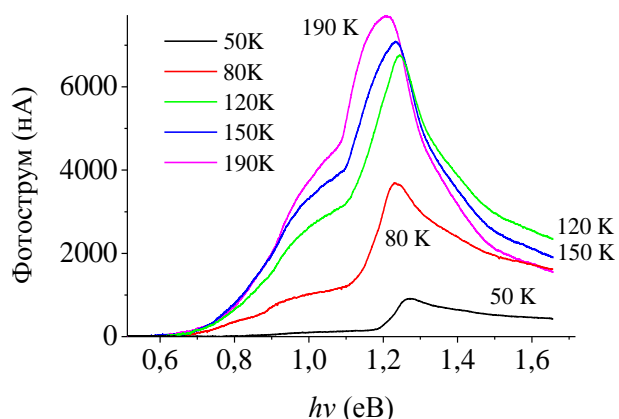


Рис. 5. Спектри поздовжньої фотопровідності багатошарової Si/Ge гетероструктури з 19 шарами nanoострівців $Si_{0.38}Ge_{0.62}$, висотою 1.1 нм, розділених шарами кремнію шириною 5 нм.

електрон-діркових пар за участю квантово-розмірних станів нанострівців $\text{Si}_{0.38}\text{Ge}_{0.62}$. Так, при температурі 50 К основний внесок у спектр фотопровідності давали носії, що фотозбуджувалися в підкладці p-Si квантами з енергією $h\nu > \epsilon_{g,\text{Si}}$. Фізичною причиною цього є особливості фотогенерації і рекомбінації нерівноважних електронів та дірок в гетероструктурах II типу, до яких належить система SiGe/Si.

За умови фотозбудження нерівноважних електрон-діркових пар внаслідок непрямих в просторі електронних переходів з локалізованих станів валентної зони $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в зону провідності Si оточення фотозбуджені дірки виявляються локалізованими в нанострівцях. Фотозбуджені електрони, при цьому, накопичуються в

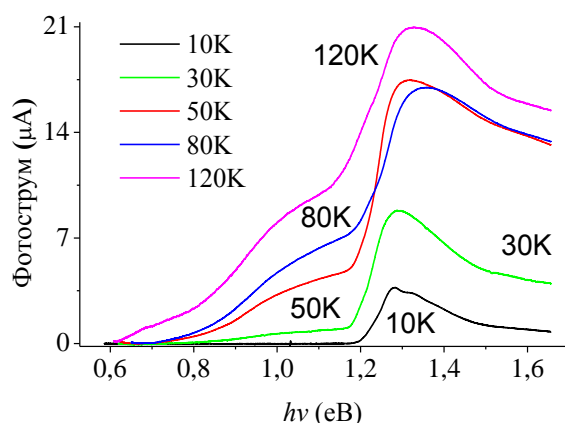


Рис. 6. Спектральні залежності поздовжньої фотопровідності 40-а періодної надгратки $\text{Si}_{0.47}\text{Ge}_{0.53}/\text{Si}_{0.87}\text{Ge}_{0.13}$, виміряні при температурах 10-30-50-80-120 К за стаціонарного збудження.

потенціальній ямі в найближчому оточенні нанострівців.

Захоплення дірок буде тим ефективнішим, чим більша глибина потенціальної ями для дірок, що реалізується на практиці в гетероструктурах з нанострівцями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, збагаченими Ge. Бути зміщеними в об'єм підкладки електричним полем шару збіднення, тим самим уникнувши рекомбінації з електронами в оточенні нанострівців, фотозбуджені дірки можуть лише після термічного викиду з потенціальної ями в делокалізовані стани кремнієвого оточення. Зниження температури, очевидно, зменшує ймовірність процесу емісії локалізованих дірок, що сприяє їх накопиченню в нанострівцях та підвищує ймовірність рекомбінації.

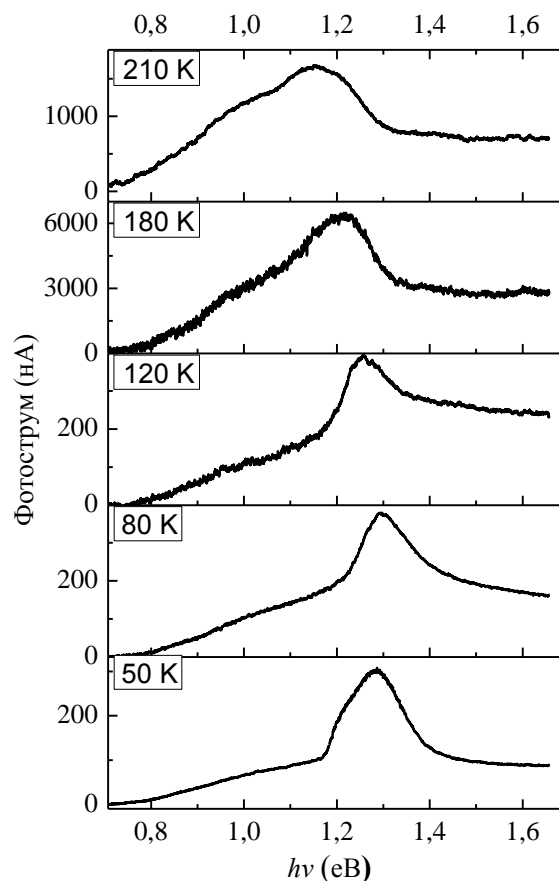


Рис. 7. Спектральні залежності поздовжньої фотопровідності p-i-n гетероструктури з квантовими точками SiGe, виміряні при температурах 50-80-120-180-210 К за стаціонарного збудження.

Поверхневий заряд захоплених надлишкових дірок впливає на величину вигину зон в підкладці p-Si. А саме, зростання додатного поверхневого заряду призведе до ще більшого збіднення в приповерхневій області просторового заряду. До того ж, напрямок електричного поля в p-Si сприяє дрейфу електронів в напрямку до поверхні, тобто в напрямку до захоплених дірок. Як наслідок, фотопровідність системи зменшується при зниженні температури при $T < 190$ К.

Порівняно зі структурою із 19 шарами нанострівців $\text{Si}_{0.38}\text{Ge}_{0.62}$, в 40-а періодній надгратці $\text{Si}_{0.47}\text{Ge}_{0.53}/\text{Si}_{0.87}\text{Ge}_{0.13}$ без тривимірних нанострівців спад в короткохвильовій області спектра фотопровідності (рис. 6) виявився меншим. Таким чином, відсутність 2D→3D переходу обумовила меншу швидкість поверхневої рекомбінації в надгратці. Причиною

цього може бути відсутність обмеження руху дірок в поздовжньому напрямку (вздовж епітаксialних шарів). Локальні поля неоднорідностей інтерфейсу $\text{Si}_{0.47}\text{Ge}_{0.53}/\text{Si}_{0.87}\text{Ge}_{0.13}$ сприяють просторовому перерозподілу дірок вздовж епітаксialних шарів, іншими словами розділяють в просторі нерівноважні електронно-діркові пари, зменшуючи ймовірність рекомбінації.

Створення вбудованого електричного поля в р-і-п гетероструктурі в напрямку, перпендикулярному до епітаксialних шарів, призвело до збільшення відносного внеску у фотопровідність носіїв, фотозбуджених в наноострівцях, та зменшення темпу рекомбінації носіїв, фотозбуджених в шарах і-Si (рис. 7). Фізичною причиною є просторове розділення нерівноважних електрон-діркових пар полем області просторового заряду.

Висновки

При дослідженні кінетики фотопровідності наногетероструктур Si/Ge при $T < 120$ К спостерігалась довготривала релаксація фотоструму. За умови фотозбудження лише

наноострівців $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ релаксація відбувалася швидше, що є свідченням більш ефективної рекомбінації за участі квантово-розмірних станів наноострівців у порівнянні з темпом рекомбінації електронно-діркових пар, фотогенерованих в підкладці Si.

Показано, що наноострівці SiGe, вбудовані в багатошарові структури на основі кремнію, є центрами рекомбінації електрон-діркових пар, фотогенерованих в Si і, загалом, визначають темп поверхневої рекомбінації гетероструктур. Виявилось, що при селективному фотозбудженні наноострівців рекомбінація електрон-діркових пар SiGe визначається просторовим розділенням нерівноважних носіїв заряду, коли дірки захоплюються станами валентної зони SiGe, а електрони опиняються в їх кремнієвому оточенні.

Робота виконувалась за підтримки Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України (проект № М/18 – 2013).

Список використаних джерел

1. Bruner K. Si/Ge nanostructures // Reports on Progress in Physics. 2002. – 65, P. 27-72.
2. Dvurechenskii A.V., Yakimov A.I., Stepina N.P., Kirienko V.V., Novikov P.L. SiGe nanodots in electro-optical SOI devices. - In: Nanoscaled Semiconductor-on-Insulator Structures and devices, ed. S. Hall, Springer, 2007. – P. 113-128.
3. Abstreiter G., Schittenhelm P., Engel C., Silveira E., Zrenner A., Meertens D. // Semicond. Sci Technol. 1996 – Vol. 11, – P. 1525.
4. Usami N., Ujihara T., Fujiwara K., Sasaki G., Nakajima K., Shiraki Y. Enhanced quantum efficiency of solar cells with self-assembled Ge dots stacked in multilayer structure // Appl. Phys. Lett. 2003, 83, 1258.
5. Bagraev N.T., Bouravleuv A.D., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Rykov S.A. Self-Ordered Microcavities Embedded in Ultra-shallow Silicon p-n Junctions // Semiconductors. 2000. – Vol. 34, No. 6. – P. 700-711.
6. J.M. Baribeau, X. Wu, N.L. Rowell, D.J. Lockwood. Ge dots and nanostructures grown epitaxially on Si // Condensed Matter. 2006/ – Vol. 18. – P. 139-174.
7. Pchelyakov O.P., Bolkhovityanov Yu.B., Dvurechenskii A.V., Sokolov L.V., Nikiforov A.I., Yakimov A.I., Voigtländer B. Quantum dots in silicon-germanium nanostructures: mechanism of formation and electronic properties // // Semiconductor Physics and Technology. 2000. – Vol. 34, No. 11. – P. 1363-1367. (in Russian)
8. Dvurechenskii A.V., Yakimov A.I. Type 2Ge/Si quantum dots // Semiconductor Physics and Technology. 2001. – Vol. 35, No. 9. – P. 1143-1153. (in Russian).
9. Shegai O.A., Zhuravlev K.S., Markov V.A., Nikiforov A.I., Pchelyakov O.P. Photoresistivity of Si/Ge/Si structures with germanium quantum dots // Semiconductor Physics and Technology. 2000. – Vol. 34, No. 11. – P. 1363-1367. (in Russian).

Надійшла до редколегії 20.05.13