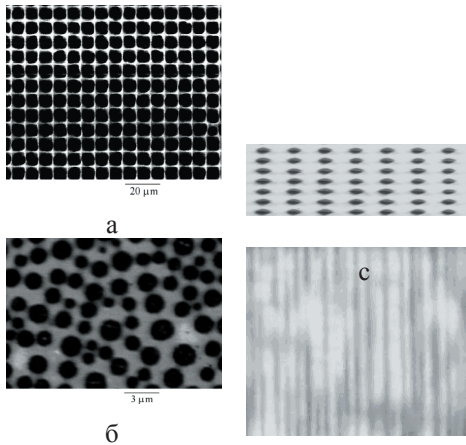


Відділ фотонних напівпровідникових структур (№20)



Двовимірні структури макropористого кремнію з періодичним (а, с) та з довільним (б) розташуванням циліндричних макropор.

Діаметр макropор: а – 6 мікрон, б - 3 ± 1 мікрон, с – 1,8 мікрон.

Відділ фотонних напівпровідникових структур було засновано в 1998 році з метою інтенсифікації пріоритетного напрямку науково-дослідних і технологічних робіт, пов'язаного з розробкою оптичних та оптоелектронних пристроїв на основі напівпровідникових фотонних кристалів.

Основні напрямки: технологія напівпровідникових фотонних структур; оптика двовимірних фотонних кристалів, у тому числі, трикомпонентних, та фотонних мікропристроїв; фотофізичні явища в напівпровідникових фотонних структурах за участю локальних поверхневих станів; розробка технологій виготовлення активних та пасивних оптичних та оптоелектронних елементів.

Технологія напівпровідникових

фотонних структур. Відпрацьовані режими електрохімічного формування макropор в дифузійно-тонких структурах макropористого кремнію при лінійній зміні прикладеної напруги, що важливо для травлення циліндричних макropор та керування їх діаметром. Визначено режими напруженості електричного поля, які забезпечують стаціонарну концентрацію дірок на кінцях макropор протягом їх формування; розрахована швидкість зміні прикладеної напруги для забезпечення режиму стаціонарності напруженості електричного поля.

Досліджена початкова стадія формування макropор у кремнію шляхом електрохімічного травлення при стаціонарному освітленні та постійній густині струму. Експериментально встановлено, що процес формування макropор бере початок з критичного значення напруги U_c , пропорційній квадрату товщини кремнієвого аноду d_c . Виявлена залежність відповідає умові постійності концентрації дірок на поверхні «кремній-електроліт» і виконується для досліджуваної системи при товщині кремнієвого аноду $d_c = 0,5L^+$ (L^+ - дифузійна довжина нерівноважних дірок по полю).

Проведено порівняльний аналіз поверхні двовимірних структур макропористого кремнію методами електронної скануючої мікроскопії, інфрачервоного поглинання та модуляційної спектроскопії електровідбивання. Встановлено, що мікроструктура поверхні макропор і вбудоване електричне поле залежать від параметрів електрохімічного процесу: вихідної напруги та густини струму, при цьому величина вбудованого електричного поля на циліндричних макропорах визначається поверхневою концентрацією Si-O та Si-H- зв'язків.

Для застосування в теплочутливих елементах сформовані дифузійно-тонкі кремнієві структури з товщиною шару макропористого кремнію 20-25 мкм, що складає 4-5 періодів структури; вперше виявлені особливі види макропор: конічні та латеральні, формування яких підвищує теплоізоляційні властивості теплочутливого елемента.

Розроблено метод хімічного модифікування стінок макропор шляхом формування покриттів Si-Al, Si-B та SiC на макропористому кремнію шляхом низькотемпературних газотранспортних реакцій. Виготовлені структури сплавів композитних матеріалів Si-Al, Si-B та SiC на макропористому кремнію з ефективним поглинанням інфрачервоного випромінювання та низькоомними контактами. Встановлено, що при густині струму, яка перевищує критичну, на стінках макропор формуються окислені мікропористі шари. Вперше зареєстрована оранжева фотолюмінесценція на макропористих структурах кремнію з нанокристаллами інтенсивністю порядку 10 мкВт/см^2 , визначені структура та хімічний склад випромінюючих стінок макропор з мікропористими шарами. Виготовлено омичні контакти до сплавів композитних матеріалів Si-Al, Si-B та SiC на макропористому кремнію з низькою величиною опору 5-100 Ом для формування сенсорів інфрачервоного випромінювання.

Оптика двовимірних фотонних кристалів. Теоретично встановлені загальні особливості формування фотонної зонної структури у двовимірних фотонних кристалах типу макропористого кремнію. На двовимірних фотонних структурах макропористого кремнію виміряна фотонна заборонена зона: спектральне положення фотонної забороненої зони в досліджених структурах макропористого кремнію відповідає співвідношенню періоду ґратки і довжини хвилі падаючого світла $2\pi a/\lambda = 5$.

Вперше встановлений механізм поглинання світла структурами макропористого кремнію, який визначається домішковим ефектом Франца-

Келдиша. Визначені електрооптична енергія та зміна напруженості вбудованого електричного поля. Проведені розрахунки електрооптичної функції першого роду, уявної частини діелектричної проникності та поглинання світла зразками макропористого кремнію. Показано, що в довгохвильовій частині спектра поглинання збільшується згідно із законом $(h\nu)^{3/2}$, а в короткохвильовій частині спектра – зменшується згідно із законом $(h\nu)^{-1/2}$ у відповідності з даними експерименту.

Розраховані зонні структури та густини станів для двовимірних фотонних кристалів за умови існування на поверхні макропор додаткового шару з іншою діелектричною проникністю. Показано, що наявність поверхневого шару суттєво впливає на фотонну зонну структуру та на ширину фотонної забороненої зони. Встановлено зменшення ширини фотонної забороненої зони у вимушено окисдованих двовимірних фотонних кристалах макропористого кремнію.

Розроблена програма розрахунків фотонної зонної структури в одно- та двовимірних фотонних кристалах з нелінійністю третього порядку для змішаної системи з нелінійним ядром. Знайдений новий тип розв'язку задачі розповсюдження електромагнітного випромінювання в системі «фотонний кристал – нелінійне середовище» за допомогою Еі-функції.

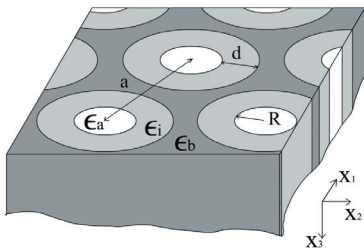
Для дослідження локалізації електромагнітного випромінювання фотонними кремнієвими елементами були відпрацьовані програми розрахунків фотонних елементів методом скінченних різниць (метод FDTD), що дозволяє задавати необхідний профіль показника заломлення, режим збудження та форму джерела електромагнітного поля. Розраховані спектри двовимірного фотонно-кристалічного резонатора на основі макропористого кремнію методом стоячих хвиль. Методом теорії збурень в нульовому наближенні розраховані спектри двовимірних фотонних кристалів, у тому числі скінченних та двовимірних метаматеріалів.

Фотофізичні явища в напівпровідникових фотонних структурах. Вперше виявлена залежність фотопровідності та інтенсивності ліній комбінаційного розсіювання від кута падіння електромагнітного випромінювання. Експериментальні результати, що отримано, пояснені формуванням поверхневих електромагнітних хвиль. Встановлено, що фотопровідність та її релаксація в структурах макропористого кремнію визначається бар'єром на поверхні макропор. Відношення фотопровідності макропористого кремнію до фотопровідності монокристала кремнію досягає максимуму при відстані між макропорами, яка дорівнює двом товщинам

шару Шотткі. Величина власної фотопровідності підсилюється більш ніж в 30 разів порівняно з монокристалічним кремнієм.

Встановлено електрофізичні параметри та кінетику фотопровідності структур «метал-макропористий кремній» з омичним та бар'єрним контактом з урахуванням послідовного опору, термодіємисійного, генераційно-рекомбінаційного та тунельного струмів. Виявлено, що релаксація фотопровідності структур макропористого кремнію відбувається за логарифмічним законом. Поверхневий бар'єр структури «індій-макропористий кремній» дорівнює 0,031 еВ, що корелює з бар'єром на вільній поверхні макропористого кремнію досліджуваних зразків. Визначена величина послідовного опору та компоненти струму насичення: термодіємисійний – 10^{-7} А, генераційно-рекомбінаційний – 10^{-4} А, тунельний – 10^{-11} А. Встановлено, що додаткові смуги фотопровідності композитних структур макропористого кремнію з нанопокриттями SiO_2 та SiC визначаються домішковим поглинанням на Si-H- та Si-C-зв'язках.

Розробка технологій виготовлення оптичних та оптоелектронних елементів.



Трикомпонентна структура, в якій в області оптичних комунікаційних довжин хвиль реалізується фотонна заборонена зона 15,6 % при періоді $a = 1,5 \mu\text{m}$, факторі заповнення $fa=0,8$, відстані між макропорами $a - D_p = 200 \text{ нм}$.

Розроблені технології виготовлення компактних неохолоджуваних тепло- та фотодетекторів на основі структур макропористого кремнію. Для використання фотонних структур макропористого кремнію у багатоелементних теплоприймачах ІЧ-діапазону спектра виготовлено збагачуючий контакт In до шарів макропористого кремнію, виготовлених при різних режимах густини струму. Температурний коефіцієнт опору такої структури складає 0,4-4%/К, рівень шумів $2-5 \times 10^{-9} \text{ В/Гц}^{1/2}$ у діапазоні 1- 10^3 Гц, що співпадає з рівнем шумів підкладок кремнію. Компактний теплоприймальний елемент на основі структур макропористого кремнію відповідає кращим зразкам

неохолоджуваних детекторів оптичного випромінювання («Неохолоджуваний теплоприймальний елемент для болометрів»; Патент України на винахід, № 80345 МПК6 G01J 5/20, H01L 31/02 від 10.09.2007. / Л.А. Карачевцева, Ф.Ф. Сизов, Ю.В. Голтвянський, К.П. Конін, О.Й. Стронська, К.А. Паршин, О.О. Литвиненко). Розроблені технологічні операції виготовлення тестово-

го позиційно-фоточутливого елемента на основі структур In-макропористий кремній з питомою виявною здатністю до $D_{\lambda}^* = 10^{10} \text{ Вт}^{-1}\text{см}\times\text{Гц}^{-1/2}$ ($\lambda \gg 1 \text{ мкм}$). Характеристики детекторів перевищують параметри кращих зразків для неохолоджуваних кремнієвих мікроболометрів і *pin*-фотодіодів завдяки високому поглинанню світла фотонною структурою в актуальній з прикладної точки зору області спектра 0,5-14 мкм та низькому рівню шумів.

Розроблено фотонні кремнієві структури для формування активних та пасивних елементів нанофотонних інтегральних схем. Трикомпонентна структура на основі двовимірного фотонного кремнієвого кристала дозволяє реалізувати максимальну ширину фотонної забороненої зони в області оптичних комунікаційних довжин хвиль (1,55 мкм) при збереженні міцності фотонного кристала («Двовимірний фотонний кристал»; Патент України на винахід, № 83123 МПК (2006) G02B 5/00 від 10.06.2008. / Л.А. Карачевцева, О.Є. Глушко).

Патент здобув номінацію «Кращий винахід 2008 р. в галузі матеріалознавства» в Україні. Він вирішує проблеми: реалізація максимальної ширини фотонної забороненої зони завдяки запропонованому співвідношенню розмірів структури, захист від старіння поверхні завдяки формуванню пасивуючого поверхневого покриття, підвищення міцності фотонного кристалу внаслідок збільшення відстані між повітряними циліндрами, які складають фотонний кристал.

Розроблено повно-оптичний спосіб оперування сигналами на основі ефекту нелінійного зсуву фотонної зони для створення повно-оптичного суматора та повно-оптичних логічних пристроїв OR, AND, XOR у двох можливих R- та T-схемах. Розроблено новий принцип формування зображень шляхом проектування променів каналами з поглинаючими стінками для канално-зображуючої мікроскопії та телескопії.

Проведено теоретичний аналіз мікропристроїв на основі двовимірних фотонних кристалів для керування оптичними сигналами. Методом плоских хвиль розраховані моделі частотного селектора та розподільника поляризацій на основі інтегрованих оптичних систем «хвилевод-фотонний кристал-хвилевод». Встановлено, що мода, яка розповсюджується по основному хвилеводу з частотою забороненої зони одного з фотонних кристалів, відбивається в рукав бокового хвилевода, демонструючи селективні властивості системи. Досліджені оптичні властивості поруватих каналних фотонних структур. Показано, що каналні (шаруваті) матеріали належать до типу метаматеріалів – метадзеркальних структур з квазі-від'ємною реф-

ракцією.

У відділі виконувались проекти УНТЦ (2003-2006 рр.), науково-дослідних робіт молодих учених за грантом НАН України (2005-2006 рр.), договори про науково-технічне та науково-педагогічне співробітництво Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка (2007-2010 рр.) та Криворізького педагогічного університету з Інститутом фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (2006-2008 рр.).

За роки існування відділу №20 опубліковано 197 наукових робіт, у тому числі 47 статей в українських журналах та 49 статей в закордонних виданнях; співробітники відділу прийняли участь в 71 конференції, у тому числі в 66 міжнародних конференціях (станом на 2008 рік).

Результати основних досліджень та розробок від. 20 надруковано у наступних виданнях:

1. Karachevtseva L.A., Lyubchenko A.V. Peculiarities of Surface Recombination in Semiconductor Structures with Photonic Band Gap // Ukrainian Physical Journal.- 1998.- V.43, N 10.- p. 1254-1258.
2. Karachevtseva L.A., Litvinenko O.A., Malovichko E.A. Stabilization of Electrochemical Process of the n-Si Macroporous Formation // J.Theor. and Experim.Chem.- 1998.- V. 34, N5.- p. 314-318.
3. Карачевцева Л.А., Литвиненко О.А., Маловичко Э.А., Стронская Е.И. Исследование процесса электрохимического формирования макропор в кремнии //Журн. Теор. и Эксперим. Химии- 1999.- Т.35, N6.- p. 414-418.
4. Karachevtseva L.A., Lytvynenko O.A., Stronska E.J. Development and optical characteristics of the macroporous silicon structures // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2000. – V. 3, № 1. – p. 22–25.
5. Карачевцева Л.А., Литвиненко О.А., Маловичко Э.А., Стронская Е.И. Исследование процесса электрохимического формирования макропор в кремнии // Теор. и эксперим. химия. – 2000. – Т. 36, № 3. – с. 193–197.
6. Карачевцева Л.А., Литвиненко О.А., Тимофеев О.Ю. Фотонные структуры на основе макропористого кремния // Неорганические материалы. – 2001.- Т.37, № 4, с. 391-395.

7. Holiney R.Yu., Matveeva L.A., Venger E.F., Karachevtseva L.A., Lytvynenko O.A. Electroreflectance study of macroporous silicon surface // *Applied Surface Science*. – 2001.- **172**, p. 214-219.
8. Karachevtseva L.A., Lytvynenko O.A., Malovichko E.A., Sobolev V.D., Stronska O.I., The bolometric characteristics of macroporous silicon structures, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, **4**(3), p. 177-182 (2001).
9. Karachevtseva L.A. Composite silicon-based photonic crystals as light emission and sensor elements, «Frontiers in Multifunctional Nanosystems», Kluwer Academic Publishers, Netherlands.- 2002, p. 413-426.
10. Карачевцева Л.А., Литвиненко О.А., Стронская Е.И. Исследование локальных химических состояний в структурах макропористого кремния // *Теор. и эксперим. химия*. – 2003. – Т. 39, № 3. – с. 193–197.
11. Карачевцева Л.А., Литвиненко О.А., Стронская Е.И. Влияние электрохимических параметров на процесс травления макропор в кремнии // *Теор. и эксперим. химия*. – 2003. – Т. 39, № 6. – с. 373–376.
12. Харламов А.И., Кириллова Н.В., Карачевцева Л.А., Харламова А.А. Парофазные реакции между твердофазными кремнием и углеродом // *Теор. и эксперим. химия*. – 2003. – Т. 39, № 6. – с. 362-367.
13. Онищенко В.Ф., Карачевцева Л.А., Карась М.І., Литвиненко О.О. Кутова залежність фотопровідності в двовимірних фотонних структурах макропористого кремнію // *Фізика і хімія твердого тіла* – 2004 – Т.5, №2 – с. 241-246.
14. L.A. Karachevtseva, O.I. Dandur'yants, V.F. Onischenko, F.F. Sizov, A. Kolek, L. Pyziak, I.S. Virt, I.S. Bilyk, Noise in 2D Macroporous Silicon Structures, *Microelectronics and Packaging Symposium*, Prague, Czech Republic, p. 484-488.
15. L.A. Karachevtseva – Two-dimensional photonic crystals as perspective materials of modern nanoelectronics – *Semicond.Phys.Quant & Optoelectronics* – 2005 – Vol.7 – №4 – p. 430-435.
16. L.A. Karachevtseva, V.F. Onischenko, M.I. Karas', O.I. Dandur'yants, F.F. Sizov, O.J. Stronska – Photoelectrical characteristics of two-dimensional macroporous silicon structures – *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2005. – Vol. 7, №. 4. – p. 425-429.
17. E.Ya. Glushko, A.E. Glushko and L.A. Karachevtseva – Theory of two-dimensional photonic crystals with lamellar pores – *Semicond.Phys.Quant & Optoelectronics* – 2005 – Vol.8 – №1 – p.64-71.

18. О.Є. Глушко, Л.А. Карачевцева. Динаміка фотонної забороненої зони у двовимірних фотонних кристалах на основі кремнію. – *Доповіді НАН України*. – 2006. – т.11 с. 27-32.
19. L.A.Karachevtseva, N.I. Karas', V.F.Onischenko, F.F.Sizov. Surface polaritons in 2D macroporous silicon structures // *Int. J. Nanotechnology* – 2006 - **3**(1), p. 76-88.
20. Glushko and L. Karachevtseva. Photonic band structure in oxidized macroporous silicon // *Opto-Electronics Review* – 2006 - **14** (3) – p. 291-293.
21. Glushko and L. Karachevtseva. PBG properties of three-component 2D photonic crystals // *Photonics and Nanostructures* – 2006 - 4 – p. 141-145.
22. L.A. Karachevtseva, A.E. Glushko, V.I. Ivanov, O.O. Lytvynenko, V.F. Onishchenko, K.A. Parshin, O.J. Stronska. Out-of-plane optical transmittance of 2d photonic macroporous silicon structures // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2007. – V.10, N.2. – p. 51-57.
23. Ivanov V.I., Karachevtseva L.A., Karas N.I., Lytvynenko O.A., Parshin K.A. Photoeffects in silicon with regular structure of pores // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2007. – V.10, № 3-4.
24. L.A. Karachevtseva. Two-Dimensional Silicon Photonic Crystals // *International Review of Physics*. – 2007.– V.1, N.3. – p. 146-152.
25. L.A. Karachevtseva, V.F. Onyshchenko, A.V. Sachenko. Kinetics of Photoconductivity in Macroporous Silicon Structures // *Ukrainian Journal of Physics*. –2008. – V.53, N.9 – p. 874-881.
26. L.A. Karachevtseva, V.I. Ivanov, O.O. Lytvynenko, K.A. Parshin, O.J. Stronska – The impurity Franz-Keldysh effect in 2D photonic macroporous silicon structures – *Applied Surface Science* – 2008 – Vol.255, №5(Part2) – p. 3328-3331.
27. E.Ya. Glushko – Metamirror channel structures: optical properties – *Metamaterials* – Vol. 2, N.4 – p. 210-215.