ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 5, № 2 (2004) С. 241-246

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 5, № 2 (2004) P. 241-246

УДК 541.013+621.315

ISSN 1729-4428

Л.А. Карачевцева, О.О. Литвиненко, М.І. Карась, В.Ф. Онищенко

Кутова залежність фотопровідності у двовимірних фотонних структурах макропористого кремнію

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
пр. Науки, 45, Київ-28, 03028, Україна, lakar@isp.kiev.ua

Досліджено ефекти підсилення фотопровідності двовимірними фотонними структурами макропористого кремнію. Виявлена залежність фотопровідності від кута падіння електромагнітного випромінювання. Величина власної фотопровідності підсилюється в 10^2 раз по відношенню до монокристалічного кремнію. Отримані експериментальні результати пояснені формуванням поверхневих електромагнітних хвиль.

Ключові слова: макропористий кремній, фотопровідність, поверхневі електромагнітні хвилі.

Стаття поступила до редакції 19.05.2003; прийнята до друку 19.05.2004.

I. Вступ

Ефекти підсилення періодичними поверхнево-неоднорідними структурами випромінювання і поглинання електромагнітного випромінювання, комбінаційного розсіювання світла, його перетворення у фотострум інтенсивно досліджуються [1-4]. Основним механізмом зазначених ефектів є формування мод коливань поверхневих осциляторів – поверхневих електромагнітних хвиль (поверхневих поляритонів).

Резонансне підсилення електромагнітного поля на границі поверхнево-активного середовища при збуджені поверхневих (хвилеводних) поляритонів призводить до поверхнево-посилених фотофізичних явищ: збільшенню виходу фотоструму поверхнево-бар'єрних структур на контакті метал-напівпровідник, метал-оксид-метал [2]. Тому поверхневі поляритони знаходять усе більше застосування у фотоприймачах (тонкоплівкових і з вузькою приповерхнево-активною областю) завдяки концентрації енергії поверхневих поляритонів на границі розділу, уздовж якої розповсюджуються [3,4]. У структурах метал-напівпровідник, метал-діелектрик-напівпровідник важливим є концентрація енергії електронно-діркових пар на поверхні, що знижує рекомбінацію в області об'ємного заряду.

Оптичне пропускання двомірних фотонних структур макропористого кремнію в напрямку, паралельному порам, досліджене в [5]. Виміряно абсолютну фотонну заборонену зону для довжин хвиль між першим і другим оптичними періодами структур. При довжинах хвиль, менших, ніж оптичний період макропор, спостерігалося підсилення поглинання електромагнітного випромінювання в 10^3 раз відносно однорідного матеріалу і формування східчастої структури. Спектри пропускання макропористого кремнію, а також формування сходинок пояснені за допомогою моделі направляючих і затухаючих оптичних мод, утворених макропористим кремнієм, як короткою хвилеводною структурою. У даній роботі досліджені кутові залежності і ефекти підсилення фотопровідності двовимірними структурами макропористого кремнію.

II. Методика експерименту

Для виготовлення структур макропористого кремнію були використані пластини n-Si опором 2-5 Ом см і орієнтацією <100>. Макропори діаметром 1-15 мкм і глибиною до 200 мкм були сформовані в результаті генерації дірок сильно поглинаючим світлом і переносу їх до границі „Si-електроліт” [6,7]. У якості електроліту був використаний 5% розчин фтористоводневої кислоти. Параметри досліджених структур наведені в таблиці.

Спектри оптичного пропускання були виміряні за допомогою ІЧ Фур'є-спектрометра IFS-113 і ІЧ спектрофотометра SPICORD M85 у діапазоні довжин хвиль 2-25 мкм. Вимірювання спектральних і кутових залежностей фотопровідності проводилося при температурах 77 К і 300 К на установці, змонтованої на базі спектрометра ІЧС-31, а також за допомогою світлодиодів.

III. Експеримент

У структурах макропористого кремнію виміряна фотопровідність, величина якої залежить від кута падіння електромагнітного випромінювання, інтенсивності і величини прикладеного електричного поля (рис. 1). Максимуми фотопровідності формуються при нормальному падінні електромагнітного випромінювання, в області кута повного внутрішнього відбивання відносно стінок макропор, що відповідає куту падіння $\theta = 22{,}5^0$, і ковзному куті падіння відносно поверхні структури. При кутах падіння θ_n, близьких до нормального, на макропорах формуються направлені оптичні моди (рис. 2), про що свідчать сходинки і осциляції в спектрах пропускання [5]. При куті повного внутрішнього відбивання від стінок макропор формується поверхнева ТМ-хвиля, що поширюється уздовж пор, що підтверджується поглинанням структурами макропористого кремнію переважно p-компоненти падаючого електромагнітного випромінювання (рис. 3). При кутах падіння θ_s, близьких до ковзного, періодичний рельєф структури з періодом a перетворює падаючу світлову хвилю в поверхневу в результаті дифракції m-го порядку: $k_s = k_0 \sin\theta_s + 2\pi m/a$. При цьому резонансне збудження поверхневої електромагнітної хвилі супроводжується зменшенням інтенсивності дзеркально відбитого

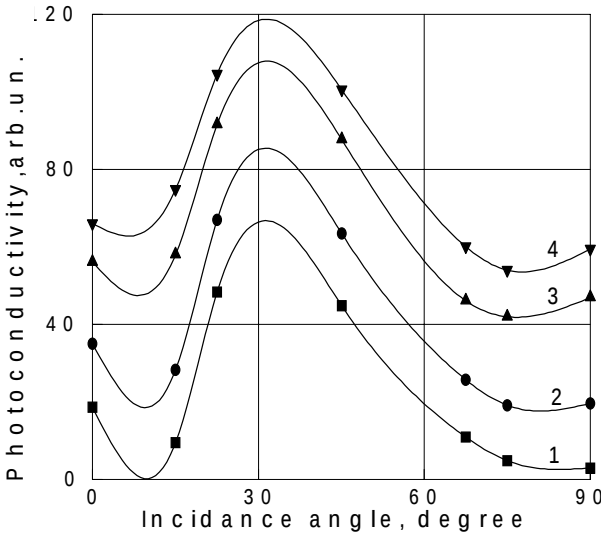

Рис. 1. Залежність фотопровідності структур макропористого кремнію, від кута падіння електромагнітного випромінювання, при темновій напрузі на зразку: (1) – 3 mV; (2) – 27 mV; (3) - 55 mV; (4) – 70 mV; (T = 77 K).

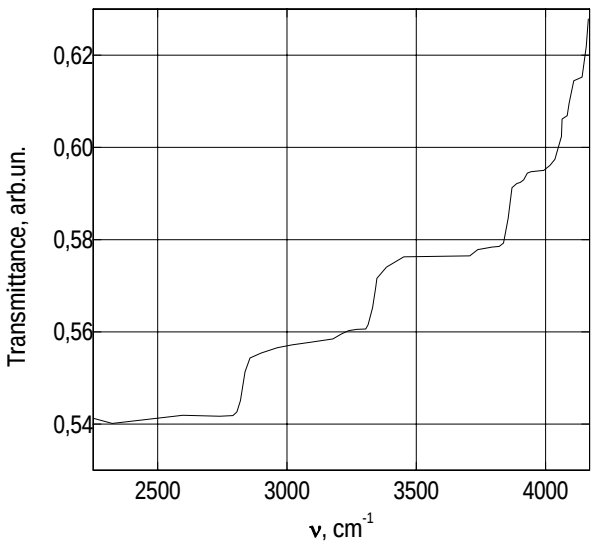

Рис. 2а. Короткохвильові сходинки в спектрі пропускання макропористого кремнію.

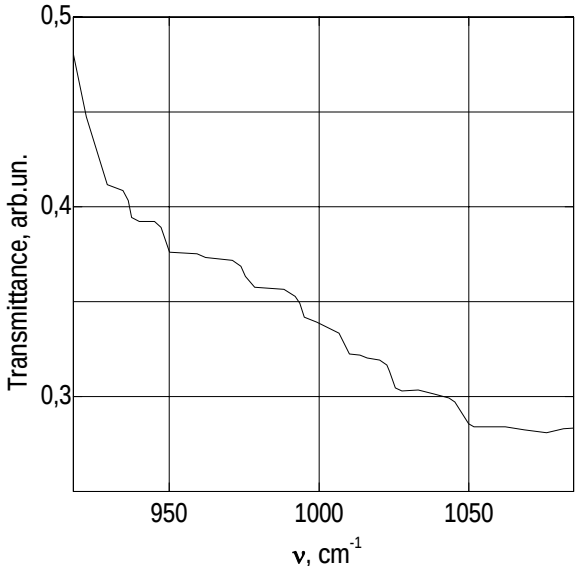

Рис. 2б. Довгохвильові сходинки в спектрі пропускання макропористого кремнію.

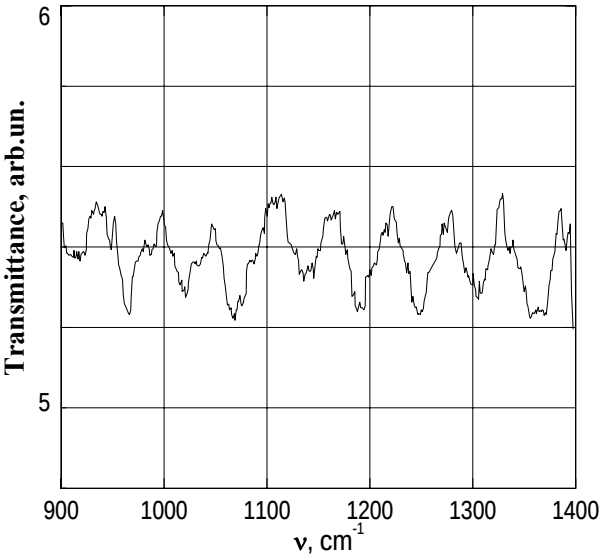

Рис. 2в. Осциляції в спектрі пропускання макропористого кремнію.

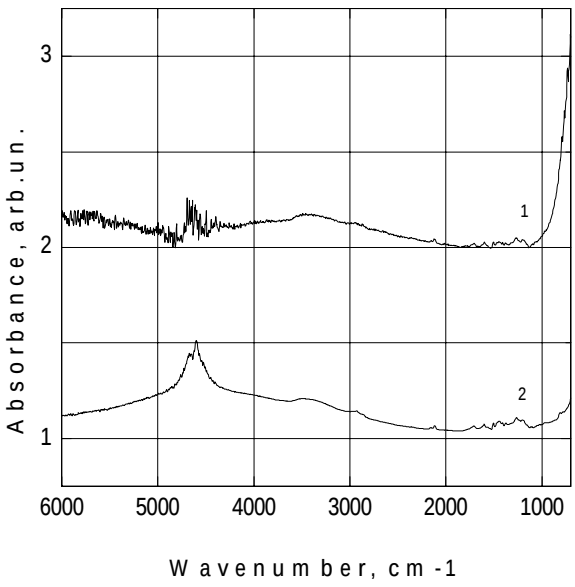

Рис. 3. Спектри поглинання структур макропористого кремнію для p-(1) і s-(2) компонент падаючого електромагнітного випромінювання.

світла і збільшенням інтенсивності світла в напрямку його падіння [8].

На рис. 4а наведена спектральна залежність фотопровідності в області власного поглинання світла монокристалом кремнію і структурами макропористого кремнію. З рисунка видно, що в структурах макропористого кремнію сигнал фотопровідності перевершує такий для монокристалічної підкладки. При максимальному підсиленні фотопровідності (рис. 4а, крива 4) виміряний зсув максимуму в довгохвильову сторону. На рис. 4б наведена залежність максимуму сигналу фотопровідності спектрів рис. 4а від відстані між макропорами a-D_p. Найбільше значення сигналу фотопровідності виміряно при відстані a-$D_p \approx 2$ мкм, при цьому сигнал фотопровідності структур макропористого кремнію перевищує $\Delta\sigma_{ph}$ монокристалу кремнію в 10^2 разів.

На рис. 5 наведені залежності фотопровідності $\Delta\sigma_{ph}$ від величини прикладеного електричного поля E (а) і від інтенсивності падаючого електромагнітного випромінювання I_{ph} (б). З рисунків випливає лінійна залежність фотопровідності від прикладеного електричного поля і сублінійна – від інтенсивності освітлення.

IV. Обговорення результатів

Отримані експериментальні результати, пов'язані з кутовими залежностями фотопровідності, а також її підсилення в порівнянні з монокристалічним кремнієм свідчать про формування поверхневих електромагнітних хвиль (поверхневих поляритонів). Формування поверхневих поляритонів підтверджується тим, що структури макропористого кремнію поглинають переважно p-компоненту падаючого електромагнітного випромінювання (рис. 3). Наявність сходинок у спектрах пропускання структур макропористого кремнію також пов'язано з формуванням поверхневих поляритонів (рис. 2). Кутові залежності фотоструму (рис. 1) свідчать про те, що поверхневі хвилі формуються в двох напрямках: уздовж макропор і уздовж поверхні структури макропористого кремнію.

Формування поверхневих поляритонів

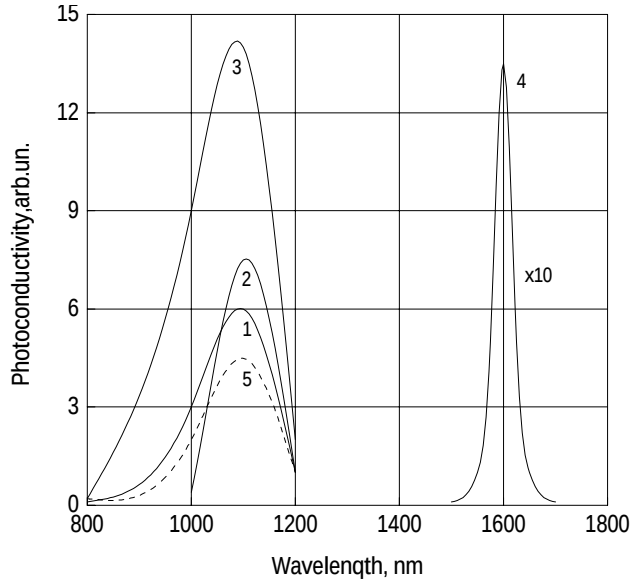

Рис. 4а. Спектральна залежність фотопровідності в області власного поглинання світла структурами макропористого кремнію (14) і монокристалом кремнію (5).

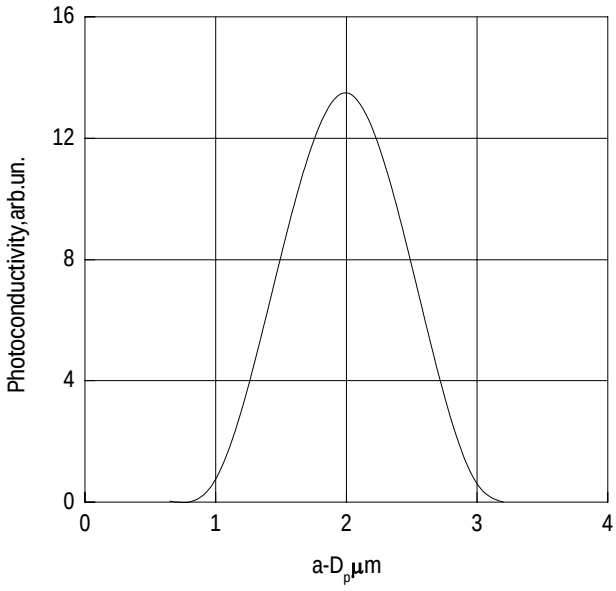

Рис. 4б. Залежність максимуму сигналу фотопровідності спектрів, наведених на рис. 4а, від відстані між макропорами a-D_p.

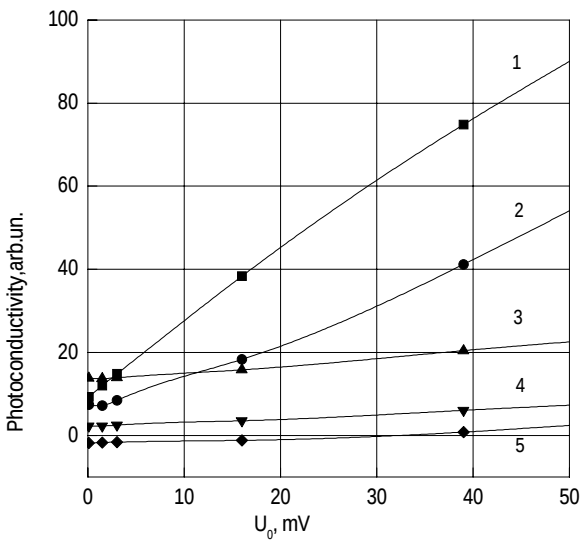

Рис. 5а. Залежності фотопровідності від величини прикладеної темнової напруги при різніх кутах падіння електромагнітного випромінювання: (1) - 0^0; (2) - 15^0; (3) - $22{,}5^0$; (4) - $67{,}5^0$; (5) - 75^0; (T = 300 K).

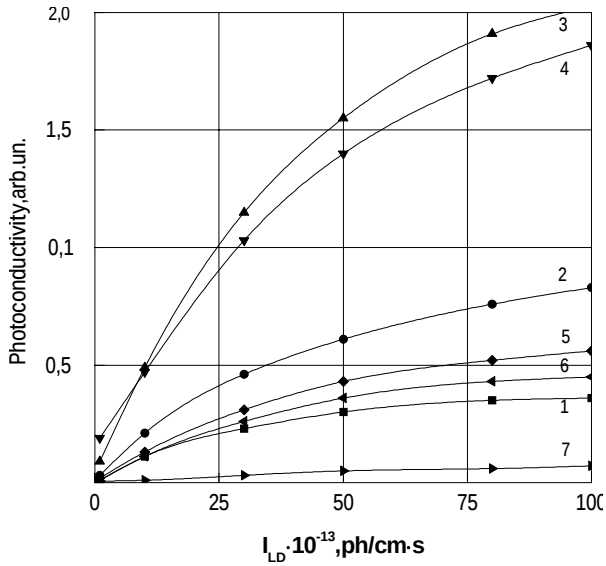

Рис. 5б. Залежності фотопровідності від інтенсивності падаючого електромагнітного випромінювання I_{LD} при різніх кутах падіння електромагнітного випромінювання: (1) - 0^0; (2) - 15^0; (3) - $22{,}5^0$; (4) - 40^0; (5) - $67{,}5^0$; (6) - 75^0 ; 7 - 90^0 (T = 300 K).

призводить до підсилення локального електричного поля на поверхні структури макропористого кремнію і поверхні макропор внаслідок накопичення електромагнітної енергії, що перевищує енергію падаючої електромагнітної хвилі в $(\varepsilon'/\varepsilon'')^2$ разів [3], де ε' і ε'' – відповідно, дійсна і уявна частини діелектричної проникності. При цьому резонансно збільшується дипольний момент макропори і її поверхневий заряд. Збільшення електричного поля на поверхні макропор призводить до їхньої взаємодії і дипольного відгуку на зовнішнє електричне поле. Для періодичної макропористої структури взаємодія дипольних локальних плазмових коливань також є резонансною [9].

Локальне поле на поверхні макропори складається з поля падаючої електромагнітної хвилі, поля деполяризації і „поля Лоренца”, обумовленого внеском від дипольних моментів навколишніх макропор (колективний ефект) [1]:

$$\mathbf{E}_{loc}(\omega_i) = \mathbf{E}_i - L\,4\pi\,\mathbf{P}_m + \beta 4\pi\,\mathbf{P}; \qquad (1)$$

де: L – фактор деполяризації, обумовлений геометрією пор, $\mathbf{P}_m$ – дипольний момент одиниця об'єму макропори, тобто її поляризація, β – константа поля Лоренца, $\mathbf{P} = N_p d_p$, N_p – концентрація макропор, $d_p = \mathbf{P}_m v_p$ дипольний момент макропори. З іншого боку, вектори поляризації $\mathbf{P}_m$ і $\mathbf{P}$ пов’язані з локальним полем співвідношеннями:

$$\mathbf{P}_m = \{[\varepsilon(\omega_i) - 1]/4\pi\}\mathbf{E}_{loc}(\omega_i),$$
$$\mathbf{P} = \{[\varepsilon - 1]/4\pi\}V_S\mathbf{E}_{loc}(\omega_i); \qquad (2)$$

де V_S – відносний об'єм макропор. Враховуючі (1) і (2) дістаємо для локального поля

$$\mathbf{E}_{loc}(\omega_i) = \mathbf{E}_i[(1 + \varepsilon(\omega_i) - 1)(L - \beta V_S)]^{-1} = \mathbf{L}(\omega_i)\mathbf{E}_i; \qquad (3)$$

Фактор локального поля досягає максимуму при рівності нулю знаменника (3) для дійсної частини $\varepsilon'(\omega_i)$ на резонансній частоті:

$$\omega_r = \omega_p[\varepsilon'(\omega_i) - 1 + 1/(L - \beta V_S)]^{-1/2}; \qquad (4)$$

де: ω_p – плазмова частота. Згідно експериментальним даним вимірювань спектрів електровідбивання [10] структурами макропористого кремнію величина вбудованого електричного поля на поверхні макропор $\mathbf{E}_{loc}(\omega_i)$ досягає значення 10^6 В/см.

Спектри пропускання структур макропористого кремнію виміряні спектрофотометром з апертурою порядку 10^0, тому при формуванні оптичних мод повинен реалізуватися багатомодовий режим. Однак, формування сходинок свідчить про реалізацію одномодового режиму. Останнє може бути пов'язане з взаємодією оптичних мод із коливаннями осциляторів на поверхні макропор і з формуванням оптико-механічних (поляритонних) мод. При цьому поглинання визначається відношенням потужності електричного поля, яка поглинається в одиниці об'єму до потужності, що проходить через одиницю поверхні:

$$A(\omega_r) = \varepsilon''V_p\omega_r|L(\omega_r)|^2(c|E_i|^2)^{-1} =$$
$$= \varepsilon''(\omega_r)V_S|L(\omega_r)|^2\omega_r/c; \qquad (5)$$

і є максимальним в області резонансних значень $|L(\omega_r)|^2$, що відповідають сходинкам і осциляціям у спектрах пропускання (рис. 2).

Експериментальні результати, наведені на рис. 1 і рис. 4, свідчать про збільшення фотоефекту в структурах макропористого кремнію завдяки формуванню поверхневих хвиль, що також пов’язано з підсиленням електричного поля поверхневих поляритонів [1,2]. Відповідність спектрів фотопровідності структур макропористого кремнію спектрам власної фотопровідності монокристалічного кремнію свідчить про збагачення поверхні структур макропористого кремнію фотоносіями і формування в цій спектральній області

поверхневих електромагнітних хвиль плазмового типу.

Коливання поверхні розповсюджуються в напівпровіднику на відстань довжини вільного пробігу електронів l_e. Отже, підсилення електричної компоненти електромагнітного поля на поверхні макропори передається в об'єм на відстань порядку довжини пробігу електрона l_e (порядку 1 мкм для використовуваних пластин кремнію). Таким чином, фотопровідність максимальна при відстані між порами $a\text{-}D_p = 2l_e \approx 2$ мкм, що відповідає даним, наведеним на рис. 4б.

Лінійна залежність фотопровідності від прикладеного електричного поля (рис. 5а) свідчить про лінійну поляризацію макропор при формуванні поверхневих поляритонів, оскільки має місце зміна розподілу надлишкових електронів пропорційно локальному полю: $n(\mathbf{r}) = -\mathbf{E}_{loc}/4\pi c$ [11].

Сублінійність люкс-амперних характеристик (рис. 5б) визначається тим, що рівень накачування поверхневих поляритонів лімітується процесами їхнього розпаду [9].

V. Висновки

У структурах макропористого кремнію виміряна фотопровідність, величина якої залежить від кута падіння електромагнітного випромінювання, інтенсивності і величини прикладеного електричного поля. Максимуми фотопровідності формуються при нормальному падінні електромагнітного випромінювання, в області кута повного внутрішнього відбивання відносно стінок макропор і при ковзному куті падіння відносно поверхні структури. Залежності фотопровідності від величини прикладеного електричного поля лінійні, а від інтенсивності падаючого електромагнітного випромінювання – сублінійні. Фотопровідність максимальна при відстані між порами, що відповідає двом довжинам вільного пробігу електронів.

Отримані експериментальні результати, пов’язані з кутовими залежностями спектрів фотопровідності, а також її підсилення в порівнянні з монокристалічним кремнієм свідчать про формування поверхневих електромагнітних хвиль (поверхневих поляритонів). Формування поверхневих поляритонів призводить до підсилення локального електричного поля на поверхні структури макропористого кремнію і поверхні макропор у результаті накопичення електромагнітної енергії, що перевищує енергію падаючої електромагнітної хвилі. При цьому величина вбудованого електричного поля на поверхні макропор досягає значення 10^6 В/см, сигнал фотопровідності підсилюється в 10^2 раз.

Карачевцева Л.А. – доктор технічних наук, зав. відділом ІФН;
Литвиненко О.О. – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник ІФН;
Карась М.І. – кандидат фізико-математичних наук науковий співробітник ІФН;
Онищенко В.Ф. – аспірант ІФН.

[1] В.И. Емельянов, Н.И. Коротеев. Эффект гигантского комбинационного рассеяния света молекулами, адсорбированными на поверхности металла // *УФН*, **135**(2), сс. 345-361 (1981).

[2] Л.В. Беляков, О.М. Сресели. Поверхностные электромагнитные волны и фотоприемники // *ФТП*, **25**(8), сс. 1281-1296 (1991).

[3] Н.Д. Дмитрук, В.Г. Литовченко, В.Л. Стрижевский. *Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках.* Наук. Думка, Киев 376 с. (1989).

[4] Є.Ф. Венгер, А.В. Гончаренко, М.Л. Дмитрук. *Оптика малих частинок і дисперсних середовищ*. Наукова думка, Київ 348 с. (1999).

[5] L.A. Karachevtseva, O.A. Lytvynenko, E.A. Malovichko, O.I Stronska, E.V. Buzaneva, A.D. Gorchinsky. Optical characteristics of macroporous silicon structures // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics,* **4**(4), c. 5 (2001).

[6] Л.А. Карачевцева, О.А. Литвиненко, Є.А Маловичко. Стабилизация электрохимического процесса формирования макропор в n-Si // *Журн. Теор. и Эксперим. Химии,* **34**(5), сс. 314-318 (1998).

[7] Л.А. Карачевцева, О.А. Литвиненко, Є.А. Маловичко, Е.І Стронская. Исследование процесса электрохимического формирования макропор в кремнии // *Теор. и эксперим. химия,* **36**(3), сс. 193-197 (2000).

[8] S. Solimeno, B. Crosignani, P. DiPorto. *Guiding, Diffraction and Confinement of Optical Radiation.* Academic Press, New York 664 p. (1986).

[9] В.А. Кособукин. Коллективные эффекты в усилении внешнего электрического поля на поверхности металлов // *Изв. АП СССР*, **40**(6), сс. 1111-1020 (1985).

[10] R.Yu. Holiney, L.A. Matveeva, E.F. Venger, L.A. Karachevtseva, O.A. Lytvynenko. Electroreflectance study of macroporous silicon surface // *Applied Surface Science*, **172**, сс. 214-219 (2001).

[11] В.А. Кособукин. Рассеяние фотонов и электронов на поверхностных колебаниях в цилиндре // *ФТТ,* **22**(4), сс. 1017-1023 (1980).

L.A. Karachevtseva, O.O. Lytvynenko, M.I. Karas', V.F. Onishchenko

The Angle Dependence of Photoconductivity in Two-Dimension Photon Structures of the Macroporous Silicon

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine
45, Nauki Av., Kyiv, 03028, Ukraine, lakar@isp.kiev.ua

Effects of the enhancement of photoconductivity in two-dimensional macroporous silicon structures were investigated. Its dependency on incidance angle of the electromagnetic illumination was revealed. Intrinsic photoconductivity signal is enhanced 10^2 times relatively monocrystalline silicon. Obtained results were explaned by the surface electromagnetic wave formation.