

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

ОСОБЛИВІСТЬ РЕЛАКСАЦІЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ФОТОПРОВІДНОСТІ В СТРУКТУРАХ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНІЮ У ВИДИМІЙ ОБЛАСТІ СПЕКТРА

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України
пр. Науки, 41, Київ, 03028, Україна, E-mail: nikar@isp.kiev.ua

У роботі наведено результати експериментального дослідження спектральної залежності часу релаксації поверхневої монополярної фотопровідності в структурах макропористого кремнію. Дослідження проводилося при сильному поверхневому поглинанні світла, при цьому коефіцієнт поглинання змінювався в діапазоні $2.37 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$, а глибина поглинання від 0.03 до 4.22 мкм. Для досліджень були використані світлодіоди видимої області спектра (0.38–0.62 мкм) ультрафіолетовий, фіолетовий, синій, зелений, жовтий, жовтогарячий і червоний. Структури макропористого кремнію формувалися на кремнії *n*-типу з орієнтацією [100] і питомим опором 4.5 Ом·см фотоелектрохімічним травленням. Макропори мали діаметр $D_p = 3.5 \text{ мкм}$, глибину $h_p = 80 \text{ мкм}$ і концентрацію $N_p = 3.5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. В структурах макропористого кремнію експериментально спостерігалася «повільна» релаксація монополярної фотопровідності. Виявлено, що час релаксації монополярної фотопровідності залежав від довжини хвилі освітлення, і у видимої області спектра змінювався в діапазоні 15.5–42 с. Залежність часу релаксації фотопровідності від довжини хвилі освітлення мала мінімум часу релаксації 15.5 с при освітленні зеленим світлом з довжиною хвилі 0.5215 мкм. Причиною залежності часу релаксації монополярної фотопровідності є конкуренція процесів рекомбінації та прилипання на «повільних» поверхневих рівнях основних носіїв заряду. Домінування процесу рекомбінації або прилипання обумовлено характеристиками локальних центрів, умовами на поверхні, поверхневим вигином зон Y_s , що і визначає поверхневу монополярну фотопровідність та її релаксацію. У довгохвильовій області спектра зменшення часу релаксації фотопровідності від 42 до 15.5 с пояснюється домінуванням процесу прилипання основних носіїв заряду на «повільних» поверхневих рівнях, які локалізовані в межах 1 нм від поверхні кремнію в перехідному шарі SiO_x . У короткохвильовій області спектра повільне збільшення часу релаксації фотопровідності з 15.5 до 23.7 с пояснюється тим, що на час релаксації фотопровідності починає впливати прилипання основних носіїв заряду на «повільних» поверхневих станах, що локалізовані в SiO_2 і мають великий час релаксації фотопровідності. Рівень прилипання поступово перетворюється на рівень сповільненої рекомбінації при великому коефіцієнті поглинання, що досягає значення $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$. Релаксація фотопровідності, пов'язана з поверхневими рівнями, обумовлюється довжиною хвилі освітлення, що викликає зміну коефіцієнта поглинання, глибини поглинання і поверхневого вигину зон Y_s . Завдяки цьому спостерігалась спектральна залежність часу релаксації поверхневої фотопровідності в структурі макропористого кремнію.

Ключові слова: релаксація, довжина хвилі освітлення, фотопровідність, макропористий кремній, мінімальний час релаксації

ВСТУП

Двовимірні структури макропористого кремнію (МПК), виготовлені методом фотоанодного травлення, перспективні для використання в опто- і фотоелектроніці. Це пов'язано з виготовленням структур з потрібною геометрією, великою питомою площею поверхні, можливістю інтеграції в мікросхеми та особливостями фотоелектричних характеристик, які визначаються процесами на поверхні макропор.

Такими фотоэффектами в приповерхневих шарах напівпровідників є негативна

монополярна фотопровідність (ФП), локалізована на глибині тонкого поверхневого шару Дебая [1–9] і аномальна фото-ЕРС [10]. Нами раніше була досліджена поверхнева ФП МПК при таких інтенсивностях світлового збудження $5 \cdot 10^{15} \text{ квант}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, коли можна говорити про насичення люкс-амперної залежності ФП [1–7]. Цей ефект по суті визначається зміною заселеності поверхневих центрів (станів) при освітленні і називається «ефектом прилипання носіїв фотоструму». Ключову роль в поверхневій ФП відіграють поверхневі

стани (ПС) або поверхневі рівні. Відповідно до класифікації локальних електронних станів, наведеної в [11], розрізняють два типи «повільних» локальних електронних станів на межі Si/SiO₂: «повільні» стани в діелектрику з характерним часом релаксації 10³–10⁴ с і «повільні» стани межі поділу (ПСМР) з часом релаксації 10⁻¹–10⁻² с. У роботах [1–7] нами досліджувалася поверхнева ФП в структурах МПК, за вимірними часами релаксації був зроблений висновок щодо присутності в структурі МПК на межі Si/SiO₂ «повільних» поверхневих рівнів, відповідальних за «повільну» поверхневу ФП. У літературі зустрічаються різні дані відносно концентрації поверхневих станів на поверхні монокристалічного кремнію: від 10¹¹ до 10¹⁵ см⁻². Концентрація ПС зазвичай дуже велика, але обмежена зверху значенням концентрації власне поверхневих атомів кристала кремнію, тобто 10¹⁵ см⁻² [11, 12]. Практично концентрацію цих ПС не вдається знизити до значень менше 10⁹ см⁻² на межі Si/SiO₂ [12].

Метою роботи було дослідження спектральної залежності часу релаксації «повільної» негативної монополярної ФП у видимій області спектра, виходячи з вимірів поверхневої ФП структур МПК в умовах сильного поверхневого поглинання світла. На підставі цього – з'ясування механізму, що визначає залежність часу релаксації структури МПК від довжини хвилі освітлення.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Вихідним матеріалом був монокристалічний кремній *n*-типу провідності з питомим опором 4.5 Ом·см. Макропори завглибшки 80 мкм, діаметром 3.5 мкм і концентрацією $N_p = 3.5 \cdot 10^6$ см⁻² були сформовані методом електрохімічного травлення в розчині фтористоводневої кислоти. Товщина структури 520 мкм. Омичні контакти сформовані при 370 °С втиранням золото-кремнієвої евтектики на поверхні структури МПК. Для дослідження ФП використовувався метод з постійним освітленням за допомогою найпростішої схеми з послідовним з'єднанням джерела напруги (батарея), зразка і навантажувального опору, з якого знімався корисний сигнал за допомогою нановольметра В2-38.

Аналоговий сигнал з нановольметра оцифровувався приставкою «Терекс» і подавався на комп'ютер. Далі цифровий сигнал оброблявся програмою і виводився на монітор. Програма нормувала і усереднювала експериментальні дані по релаксації фотопровідності. Вимірювання проводились з інтервалом 0.1 с. Час релаксації фотопровідності визначався в програмі «Origin 7.0» як за нахилом кривої в напівлогарифмічному масштабі, так і підгонкою функції спадаючої експоненти в «Fitting Wizard» (Майстер підгонки). Вимірювання проводилися в режимі максимальної чутливості при рівності опорів вимірюваної структури і навантажувального опору. Як джерело світла використовувалися сім світлодіодів з приблизно однаковою випромінювальною потужністю у видимій області спектра: ультрафіолетовий, фіолетовий, синій, зелений, жовтий, жовтогарячий і червоний з довжинами хвиль 0.38, 0.398, 0.4559, 0.5215, 0.589, 0.6065, 0.623 мкм відповідно. Дебаєвська довжина екранування для нашого випадку ($n_0 = 1.34 \cdot 10^{15}$ см⁻³) дорівнює 0.12 мкм, а товщина області просторового заряду (ОПЗ) становила 1.146 мкм [4].

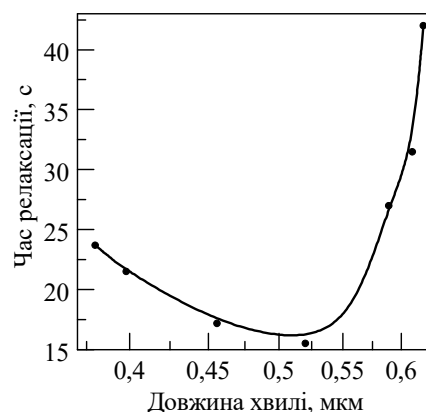


Рис. 1. Залежність часу релаксації фотопровідності в макропористому кремнії від довжини хвилі світла

На рис. 1 та 2 представлені результати вимірювань спектральної залежності часу релаксації структури МПК у видимій області спектра. Мінімальний час релаксації (15.5 с) спостерігається при освітленні структури МПК зеленим світлом з довжиною хвилі 0.5215 мкм. На рис. 2 показана релаксація фотопровідності для випадку мінімального

часу релаксації при включенні і виключенні освітлення. Після включення освітлення протягом 100 с настає насичення фотопровідності (див. рис. 2). Після вимкнення освітлення протягом 100 с фотопровідність зникає. У короткохвильовій частині спектра час релаксації повільно зростає до 23.7 с. У довгохвильовій частині спостерігається більш різке його зростання до 42 с.

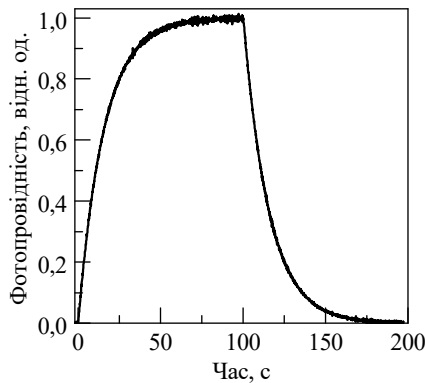


Рис. 2. Релаксація фотопровідності в макропористому кремнії при ввімкненні, вимкненні освітлення з довжиною хвилі 0.5215 мкм

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

В експерименті реалізований випадок сильного приповерхневого поглинання світла з довжиною хвилі у видимому діапазоні спектра (0.62–0.38 мкм). У всьому цьому діапазоні спостерігалася негативна ФП. Час релаксації змінювався від 15.5 до 42 с в залежності від довжини хвилі освітлення. У роботах [1–7] нами була експериментально досліджена поверхнева негативна ФП, наявність якої пояснювалася присутністю на поверхні кремнію «повільних» поверхневих рівнів. Відповідно до класифікації локальних електронних станів, наведеної в [11], розрізняють два типи «повільних» локальних електронних станів (рівнів) на межі поділу Si/SiO₂: «повільні» стани в діелектрику з характерним часом релаксації 10³–10⁴ с і «повільні» стани межі поділу Si/SiO₂, які локалізовані в межах 1 нм від поверхні кремнію в перехідному шарі SiO_x з часом релаксації 10⁻¹–10⁻² с. «Повільні» поверхневі рівні проявляють себе тим, що викликають релаксацію ФП через те, що утруднений обмін носіями заряду між цими рівнями і

зоною провідності в об'ємі напівпровідника. Відомо, що негативна монополярна ФП σ_{ml} реалізується при інверсійному вигині зон (в нашому випадку з розрахунку отримано значення Y_s = -22.8 [4]), який виникає при прилипанні на «повільних» поверхневих рівнях основних носіїв заряду. Залежно від умов на поверхні, поверхневого вигину зон Y_s, температури зразка, способу збудження нерівноважних носіїв поверхнева монополярна ФП може визначатися рекомбінацією, прилипанням неосновних або основних (щодо об'єму) носіїв, а також одночасно декількома механізмами [13]. Релаксація ФП має відмінні риси по кінетичним характеристикам для трьох характерних станів поверхні – виснаження, інверсії і збагачення. У нашому експерименті кінетичні характеристики змінювалися зі зміною довжини хвилі освітлення, і при цьому змінювався коефіцієнт поглинання, глибина поглинання (див. Таблицю) і поверхневий вигин зон Y_s. Згідно [14], час повільної релаксації ФП залежить від поверхневого вигину зон як:

$$\tau_{ф.м.} \sim \exp(-Y)/N_{т.м.}, \quad (1)$$

де N_{т.м.} – концентрація «повільних» поверхневих рівнів. Залежність часу релаксації від довжини хвилі світла (рис. 1) пояснюється наступним чином: при зменшенні довжини хвилі освітлення від 0.623 мкм (червоне світло) до 0.5212 мкм (зелене світло) коефіцієнт поглинання зростає, а глибина поглинання зменшилася до 1 мкм, що приблизно дорівнює товщині області просторового заряду (1.146 мкм). При цьому час релаксації ФП досягав мінімального значення 15.5 с, завдяки тому, що склалися оптимальні умови для захоплення на «повільні» поверхневі рівні нерівноважних фотоносіїв (основних носіїв заряду по відношенню до об'єму). Згідно [11] повільні стани межі розділу Si/SiO₂ локалізовані в інтервалі 1 нм від напівпровідника в перехідному SiO_x шарі, тобто поглинання відбувається поблизу локалізації «повільних» поверхневих рівнів (виконують роль рівнів прилипання), на які захоплюються основні носії заряду і при цьому час релаксації мінімальний (15.5 с). При подальшому зменшенні довжини хвилі освітлення і збільшенні коефіцієнта

поглинання (зменшенні глибини поглинання), зростанні вигину зон починають позначатися рекомбінаційні процеси на поверхні, а також прилипання основних носіїв заряду на «повільні» поверхневі стани, локалізовані в SiO_2 , з великим часом релаксації [11]. Рівень

прилипання на поверхні перетворюється в рівень сповільненої рекомбінації [14]. Крім цього зміна Y_s впливає на величину повільної релаксації ФП згідно (1). Всі ці фактори призводять до повільного зростання часу релаксації до 23.7 с.

Таблиця. Значення коефіцієнта поглинання і глибини поглинання від довжини хвилі освітлення (використані дані [15])

Тип світлодіода	Ультрафіолетовий	Фіолетовий	Синій	Зелений	Жовтий	Жовтогарячий	Червоний
Довжина хвилі, мкм	0.38	0.398	0.456	0.5215	0.589	0.6065	0.623
Коефіцієнт поглинання, см^{-1}	$3 \cdot 10^5$	10^5	$3 \cdot 10^4$	10^4	$5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$2.37 \cdot 10^3$
Глибина поглинання, мкм	0.03	0.1	0.33	1	2	2.5	4.22

ВИСНОВКИ

1. Експериментально виявлено особливість в спектральній залежності часу релаксації фотопровідності в макропористому кремнії в оптичному діапазоні спектра – мінімальний час релаксації (15.5 с) спостерігається при зеленому освітленні на довжині хвилі 0.5215 мкм.

2. Проведено експериментальне дослідження спектральної залежності часу релаксації поверхневої негативної монополярної фотопровідності при сильному поверхневому поглинанні світла у видимій області спектра ($\lambda = 0.38\text{--}0.623$ мкм) в структурах макропористого кремнію. Коефіцієнт поглинання змінювався в діапазоні від $2.37 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$.

3. Встановлено залежність часу релаксації від довжини хвилі освітлення з мінімумом 15.5 с при $\lambda = 0.5215$ мкм (зелене світло). У довгохвильовій області спектра зменшення часу релаксації від 42 до 15.5 с пояснюється домінуванням процесу прилипання основних носіїв заряду на «повільних» поверхневих рівнях, які локалізовані в інтервалі 1 нм від поверхні кремнію в перехідному шарі SiO_x . У короткохвильовій області спектра повільне збільшення часу релаксації з 15.5 до 23.7 с пояснюється тим, що на час релаксації починає впливати прилипання основних носіїв заряду на «повільних» поверхневих станах, локалізованих в SiO_2 , з великим часом релаксації. Рівень прилипання поступово перетворюється на рівень сповільненої рекомбінації при великому коефіцієнті поглинання, що досягає значення $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$.

Peculiarities of surface photoconductivity relaxation in the structures of macroporous silicon in the visible spectrum

N.I. Karas, L.A. Karachevtseva, V.F. Onyshchenko

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine
41 Nauki Ave., Kyiv, 03680, Ukraine, nikar@isp.kiev.ua

An experimental study has been carried out on the spectral dependence of the relaxation time of surface monopolar photoconductivity in the structures of macroporous silicon, with strong surface absorption of light, while the absorption coefficient varied in the range $2.37 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$, and the absorption depth from $0.03 \mu\text{m}$ to $4.22 \mu\text{m}$. Visible LEDs $0.38 - 0.62 \mu\text{m}$ were used for the studies: ultraviolet, violet, blue, green, yellow, orange and red. Structures of macroporous silicon were formed on n-type silicon with orientation [100] and specific resistivity of $4.5 \Omega\text{-cm}$ using photoelectrochemical etching. The macropores had a diameter of $D_p = 3.5 \mu\text{m}$, a depth of $h_p = 80 \mu\text{m}$ and a concentration of $N_p = 3.5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$. In the structures of macroporous silicon, a "slow" relaxation of monopolar photoconductivity was experimentally observed. It has been found that the relaxation time of monopolar photoconductivity is dependent on the wavelength of the illumination and varies in the range of $15.5 - 42 \text{ s}$ in the visible range of $0.38 - 0.62 \mu\text{m}$. Moreover, the dependence of the photoconductivity relaxation time on the illumination wavelength had a minimum relaxation time of 15.5 s when illuminated by green light with a wavelength of $0.5215 \mu\text{m}$. The reason for the dependence of the relaxation time of the monopolar photoconductivity on the wavelength is the competition of the processes of recombination and trapping of the main charge carriers on the so-called "slow" surface levels. The dominance of the recombination or trapping process is influenced by the characteristics of local centers, the surface conditions, the surface bending of the Y_s zones, which determines the surface monopolar photoconductivity and its relaxation. In the long-wavelength region of the spectrum, the decrease in the photoconductivity relaxation time from 42 s to 15.5 s is explained by the dominance of the trapping process of the main charge carriers at "slow" surface levels, which are localized within 1 nm of the silicon surface in the SiO_x transition layer. In the short-wavelength region of the spectrum, the slow increase in the photoconductivity relaxation time from 15.5 to 23.7 s is explained by the fact that the trapping of the main charge carriers in the "slow" surface states, which are localized in SiO_2 and have a longer photoconductivity relaxation time, begins to influence the photoconductivity relaxation time. The level of sticking gradually turns into the level of slow recombination with a large absorption coefficient, reaching values of $3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$. The photoconductivity relaxation associated with surface levels changes with a change in the wavelength of illumination, which causes a change in the absorption coefficient, absorption depth, and surface bending of the Y_s zones. Due to this, a spectral dependence was observed of the relaxation time of surface photoconductivity in the structure of macroporous silicon.

Keywords: relaxation, photoconductivity, macroporous silicon, minimum relaxation time

Особенность релаксации поверхностной фотопроводимости в структурах макропористого кремния в видимой области спектра

Н.И. Карась, Л.А. Карачевцева, В.Ф. Онищенко

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины
пр. Науки, 41, Киев, 03028, Украина, nikar@isp.kiev.ua

В работе проведены результаты экспериментального исследования спектральной зависимости времени релаксации поверхностной монополярной фотопроводимости в структурах макропористого кремния. Исследование проводилось при сильном поверхностном поглощении света, при этом коэффициент поглощения изменялся в диапазоне $2.37 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$, а глубина поглощения от 0.03 до 4.22 мкм . Для исследований были использованы светодиоды видимой области спектра $0.38 - 0.62 \text{ мкм}$: ультрафиолетовый, фиолетовый, синий, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Структуры макропористого кремния формировались на кремнии n-типа с ориентацией [100] и удельным сопротивлением $4.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ фотоэлектрохимическим травлением. Макропоры имели диаметр $D_p = 3.5 \text{ мкм}$, глубину $h_p = 80 \text{ мкм}$ и концентрацию $N_p = 3.5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. В структурах макропористого кремния экспериментально наблюдалась

«медленная» релаксация монополярной фотопроводимости. Установлено, что время релаксации монополярной фотопроводимости зависело от длины волны освещения, и в видимой области спектра 0.38–0.62 мкм изменялось в диапазоне 15.5–42 с. Причем, зависимость времени релаксации фотопроводимости от длины волны освещения имела минимум времени релаксации 15.5 с при освещении зеленым светом с длиной волны 0.5215 мкм. Причиной зависимости времени релаксации монополярной фотопроводимости от длины волны является конкуренция процессов рекомбинации и прилипания на «медленных» поверхностных уровнях основных носителей заряда. Доминирование процесса рекомбинации или прилипания обусловлено характеристиками локальных центров, условиями на поверхности, поверхностным изгибом зон Y_s , что и определяет поверхностную монополярную фотопроводимость и ее релаксацию. В длинноволновой области спектра уменьшение времени релаксации фотопроводимости от 42 до 15.5 с объясняется доминированием процесса прилипания основных носителей заряда на «медленных» поверхностных уровнях, которые локализованы в пределах 1 нм от поверхности кремния в переходном слое SiO_x . В коротковолновой области спектра медленное увеличение времени релаксации фотопроводимости с 15.5 до 23.7 с объясняется тем, что на время релаксации фотопроводимости начинает влиять прилипание основных носителей заряда на «медленных» поверхностных состояниях, которые локализованы в SiO_2 и имеют большое время релаксации фотопроводимости. Уровень прилипания постепенно превращается в уровень замедленной рекомбинации при большом коэффициенте поглощения, достигающем значения $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$. Релаксация фотопроводимости, связанная с поверхностными уровнями, обуславливается длиной волны освещения, что вызывает изменение коэффициента поглощения, глубины поглощения и поверхностного изгиба зон Y_s . Благодаря этому наблюдалась спектральная зависимость времени релаксации поверхностной фотопроводимости в структуре макропористого кремния.

Ключевые слова: релаксация, фотопроводимость, макропористый кремний, минимальное время релаксации

ЛІТЕРАТУРА

1. Карась Н.И., Паршин К.А. Эффект локализации фотопроводимости в структурах макропористого кремния // Химия, физика и технология поверхности. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 246–250.
2. Konin K.P., Goltvyansky Yu.V., Karachevtseva L.A. et al. Photoconductivity of Macroporous and Nonporous Silicon with Ultra thin Oxide Layers // J. Electron. Mater. – 2018. – V. 47. – P. 5105–5108.
3. Карась Н.И., Онищенко В.Ф., Калустова Д.А., Корнага В.И. “Медленные” поверхностные уровни и релаксация фотопроводимости в структурах макропористого кремния в фиолетовой области оптического спектра // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 2017. – № 52. – С. 135–140.
4. Карась Н.И. Отрицательная фотопроводимость в структурах макропористого кремния // Новые технологии. – 2010. – Т. 1, № 27. – С. 118–123.
5. Карась Н.И., Онищенко В.Ф. Монополярная фотопроводимость инверсионного слоя и “медленные” поверхностные уровни в структурах макропористого и монокристаллического кремния в условиях сильного поверхностного поглощения света // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 2018. – № 53. – С. 268–272.
6. Онищенко В.Ф., Карась М.И. Релаксация фотопровідності в макропористому кремнії // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 2018. – № 53. – С. 248–253.
7. Karachevtseva L.A., Karas' M.I., Onishchenko V.F., Sizov F.F. Enhancement of the photoconductivity in 2D photonic macroporous silicon structures // Photonic Crystal Materials and Devices II, Proc. SPIE. – 2004. – V. 5360. – P. 381–389.
8. Ляшенко В.И., Литовченко В.Г., Степко И.И. и др. Электронные явления на поверхности полупроводников. – Киев: Наукова думка, 1968. – 400 с.
9. Саченко А.В., Снитко О.В. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников. – Киев: Наукова думка, 1984. – 232 с.
10. Onyshchenko V.F., Sachenko A.V., Karachevtseva L.A. Anomalous-sign photovoltage in macroporous silicon at photon energies comparable to that of indirect band-to-band transition // Ukr. J. Phys. – 2009. – V. 54, N 12. – P. 1212–1218.
11. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. – В 2-х кн. – Книга 2. – Москва: Техносфера, 2015. – 724 с.
12. Горшков А.П., Тихов С.В. Физика поверхности полупроводников: Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 101 с.

13. Литовченко В.Г., Ляшенко В.И. Прилипание неравновесных носителей тока на поверхности германия // Физика твердого тела. – 1962. – Т. 4, № 8. – С. 1985–1993.
14. Литовченко В.Г., Горбань А.П., Ковбасюк В.П. Исследование эффекта прилипания фотоносителей тока на поверхности кремния // Физика твердого тела. – 1965. – Т. 7, № 2. – С. 565–572.
15. Green M.A. High Efficiency Silicon Solar Cells. – Switzerland: Trans Tech Publ., 1987.

REFERENCES

1. Karas' N.I., Parshin K.A. The effect of photoconductivity localization in macroporous silicon. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. 2016. **7**(2): 246. [in Russian].
2. Konin K.P., Goltvyansky Yu.V., Karachevtseva L.A., Karas M.I., Morozovs'ka D.V. Photoconductivity of Macroporous and Nonporous Silicon with Ultra thin Oxide Layers. *J. Electron. Mater.* 2018. **47**: 5105.
3. Karas' N.I., Onyshchenko V.F., Kalustova D.A., Cornaga V.I. "Slow" surface levels and relaxation of photoconductivity in the structures of macroporous silicon in the violet range of the optical spectrum. *Optoelectronics and Semiconductor Technics*. 2017. **52**: 135. [in Russian].
4. Karas M.I. Negative photoconductivity in macroporous silicon structures. *New Technol.* 2010. **1**(27): 118. [in Russian].
5. Karas M.I., Onyshchenko V.F. Monopolar photoconductivity of the inversion layer and "slow"-surface levels in the structures of macroporous and monocrystalline silicon in conditions of strong surface lightning. *Optoelectronics and Semiconductor Technics*. 2018. **53**: 268. [in Russian].
6. Onyshchenko V.F., Karas' M.I. Relaxation of photoconductivity in macroporous silicon. *Optoelectronics and Semiconductor Technics*. 2018. **53**: 248. [in Ukrainian].
7. Karachevtseva L.A., Karas' M.I., Onishchenko V.F., Sizov F.F. Enhancement of the photoconductivity in 2D photonic macroporous silicon structures. *Photonic Crystal Materials and Devices II, Proc. SPIE*. 2004. **5360**: 381.
8. Lyashenko V.I., Litovchenko V.G., Stepko I.I., Striha V.I., Lyashenko L.V. *Electronic phenomena on the surface of semiconductors*. (Kyiv: Naukova Dumka, 1968). [in Russian].
9. Sachenko A.V., Snitko O.V. *Photoeffects in presurface semiconductor layers*. (Kyiv: Naukova Dumka, 1984). 232. [in Russian].
10. Onyshchenko V.F., Sachenko A.V., Karachevtseva L.A. Anomalous-sign photovoltage in macroporous silicon at photon energies comparable to that of indirect band-to-band transition. *Ukr. J. Phys.* 2009. **54**(12): 1212.
11. Belous A.I., Soloduha V.A., Shvedov S.V. *Space electronics*. V. 2. (Moscow: Technosphere, 2015). [in Russian].
12. Gorshkov A.P., Tikhov S.V. *Semiconductor Surface Physics*. (Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2013). [in Russian].
13. Litovchenko V.G., Lyashenko V.I. Adhesion of nonequilibrium charge carriers on Ge surface. *Physics of the solid state*. 1962. **4**(8): 1985. [in Russian].
14. Litovchenko V.G., Gorban A.P., Kovbasyuk V.P. Investigation of the sticking effect of current photocarriers on a silicon surface. *Physics of the solid state*. 1965. **7**(2): 565. [in Russian].
15. Green M.A. *High Efficiency Silicon Solar Cells*. (Switzerland: Trans. Tech. Publications, 1987).

Надійшла 04.11.2019, прийнята 25.05.2020