

ДИНАМІЧНА ПОВЕДІНКА ФОТОЕЛЕМЕНТІВ ТА ФОТОПАНЕЛЕЙ ПІД ДІЄЮ ІМПУЛЬСНОГО КОГЕРЕНТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Отримано 07 лист. 2022; рекомендовано до публікації 27 груд. 2022
Доступно онлайн 30 груд. 2022

Д. В. Бондаренко¹

¹ канд. техн. наук. Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна.
<http://orcid.org/0000-0002-5629-930X>

Автор для кореспонденції: Дмитро Бондаренко,
e-mail: dima7007bond@gmail.com

Мета роботи – дослідження динамічної поведінки фотоелементів і фотопанелей під дією імпульсного когерентного випромінювання, а саме під дією випромінювання напівпровідникового інжекційного лазера. В роботі показані швидкісні рівняння для концентрації носіїв зарядів та густини фотонів у напівпровіднику, які описують динамічну поведінку напівпровідникового лазера та фотоелемента. Описані параметри швидкісних рівнянь. Також в роботі показані електричні моделі (еквівалентні схеми) напівпровідникового лазера і фотоелемента для проведення моделювання електричних кіл та проведення теоретичного аналізу процесів в таких колах. Надані рівняння для еквівалентних схем в електричних величинах та параметрах електричних кіл. Розроблене устаткування для проведення експериментального дослідження динамічної поведінки фотоелементів і фотопанелей під дією імпульсного когерентного випромінювання, для чого були використані блоки живлення, модуляції, випромінювання, аналізу електричних сигналів. Проведене експериментальне дослідження фотоелемента і двох фотопанелей різної потужності під дією лазерного випромінювання з різною концентрацією променя (концентрований промінь та розсіяний). Отримані осцилограми перехідних процесів у фотоелементі та фотопанелях. Проведений аналіз, з якого видно, що завдяки релаксацийним процесам та процесам накопичення в досліджуваних напівпровідникових пристроях відбувається зміна форми фронтів електричних імпульсів на виході фотоелемента та фотопанелей. Видно, що при опроміненні всієї площі фотоелектричних панелей форма вихідного електричного імпульсу є чіткішою для детектування імпульсного сигналу в демодуляторі. Зроблені висновки, зокрема, що паразитні елементи фотоелектричних панелей спричиняють суттєве затягування перехідного процесу при когерентному опроміненні і що для уникнення збільшення часу фронту імпульсу бажано опромінювати фотопанель в цілому. Бібл. 11, рис. 11.

Ключові слова: динамічна поведінка, фотопанель, фотоелемент, когерентне випромінювання, лазер.

DYNAMIC BEHAVIOR OF PV-CELLS AND PV-PANELS UNDER PULSE COHERENT RADIATION

Received 07 Nov. 2022; accepted 27 Dec. 2022.
Available online 30 Dec. 2022

D. Bondarenko¹

¹ Cand. of tech. Sciences. Institute of renewable energy, NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-5629-930X>

Author for correspondence: Dmytro Bondarenko,
e-mail: dima7007bond@gmail.com

The goal of the work is to research the dynamic behavior of photocells and photopanel under the action of pulsed coherent radiation, namely under the action of semiconductor injection laser radiation. The rate equations for the concentration of charge carriers and the density of photons in a semiconductor are presented, which describe the dynamic behavior of a semiconductor laser and a photocell. The parameters of rate equations are described. The paper also shows electrical models (equivalent circuits) of a semiconductor laser and a photocell for modeling electrical circuits and conducting theoretical analysis of processes in such circuits. The equations for equivalent circuits in electric values and parameters of electric circuits are written. Equipment

has been developed for conducting an experimental research of the dynamic behavior of photocells and photopanel under the action of pulsed coherent radiation. For what power supplies, modulator, laser, analyser of electrical signals were used. An experimental research of a photocell and two photo-panels of different power under the action of laser radiation with different beam concentrations (concentrated beam and dispersed beam) was done. The oscillograms of transients in the photocell and photopanel are obtained. The analysis is carried out, which shows that due to relaxation processes and accumulation processes in the researched semiconductor devices there is a change in the shape of the fronts of electrical pulses at the output of the photocell and photopanel. It can be seen that when the total area of photovoltaic panels is irradiated, the shape of the output electric pulse is clearer for detecting the pulse signal in the demodulator. It is concluded, in particular, that the parasitic elements of photovoltaic panels cause a significant delay in the transient process under co-herent irradiation, and that to avoid increasing the time of the front of pulse, it is desirable to irradiate the photopanel as a total.

Keywords: dynamic behavior, pv-panel, pv-element, coherent irradiation, laser.

Вступ. Фотоелементи як складова частина сонячних фотопанелей, батарей та електростанцій для генерування електричної енергії переважно використовується в статичних режимах, а саме при постійному опроміненні або опроміненні, яке змінюється повільно. Але фотогальванічна здатність фотоелементів може бути використана також при дії швидкозмінного опромінення, наприклад, пульсуючого. Детектування електричного сигналу на сонячних фотоелементах від віддаленого передавача, який передається оптичним шляхом, можливо здійснити безпосередньо на виводах фотоелемента. Отже, швидкісні характеристики, перехідні процеси у фотоелементах мають бути досліджені та вивчені.

Актуальність досліджень, для енергетики зокрема, обумовлена також можливістю одночасної роботи фотоелементів або фотопанелей у складі енергетичної установки та для детектування оптичних дискретних сигналів. А саме для прийому інформаційних сигналів систем зв'язку, детектування лазерного опромінення й тестування встановленого обладнання сонячної генерації (фотопанелей, фотоелементів) на працездатність, деградацію, ефективність з використанням лазерного опромінення.

Постановка завдання. Експериментально дослідити динамічну поведінку фотоелементів та панелей різної структури під дією пульсуючого когерентного опромінення. Як опромінювач використати напівпровідниковий інжекційний лазер інфрачервоного діапазону. Надати теоретичне підґрунтя досліджуваних процесів для розуміння та аналізу отриманих результатів [1].

Швидкісні рівняння системи. Для проведення теоретичного аналізу динамічних, перехідних процесів в такій системі використовуються швидкісні рівняння для напівпровідникового лазера (1), (2) [2–4] та для фотоелемента (3) [5]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_N} - \alpha NP; \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha NP - \frac{P}{\tau_P} + \beta N; \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \gamma P - \frac{S}{\tau_s}, \quad (3)$$

де N – концентрація носіїв заряду в активній зоні лазера, P – густина фотонів в активній зоні лазера, S – концентрація носіїв заряду в фотоелементі, J – густина струму накачки напівпровідникового лазера, e – заряд електрона, d – товщина активної зони лазера, τ_N – час спонтанної рекомбінації носіїв заряду в активній зоні лазера, τ_P – час життя фотонів в активній зоні лазера, τ_s – час рекомбінації носіїв заряду в фотоелементі, α – коефіцієнт оптичного підсилення, β – частка спонтанного випромінювання, яка попадає в оптичну моду, γ – коефіцієнт поглинання фотонів з генерацією носіїв заряду в фотоелементі [5,6].

Електричні еквівалентні схеми лазера та фотоелемента. Розглянемо електричні моделі (еквівалентні схеми заміщення) сонячного елемента (рис. 1) [7] та напівпровідникового інжекційного лазера (рис. 2) [8, 9]

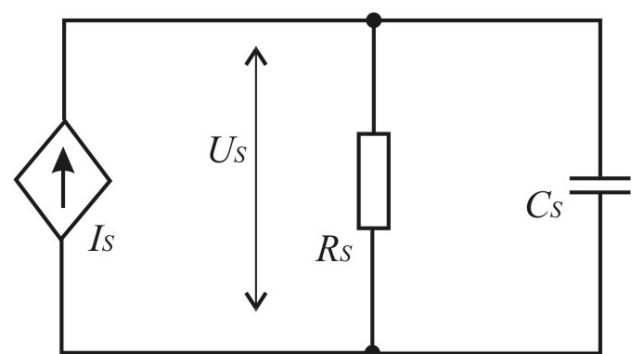


Рис. 1. Електрична модель сонячного фотоелемента

Fig. 1. Electrical model of solar PV-cell

На рис.1 видно, що крім генерувального елемента – ідеального джерела струму є пасивні елементи, які

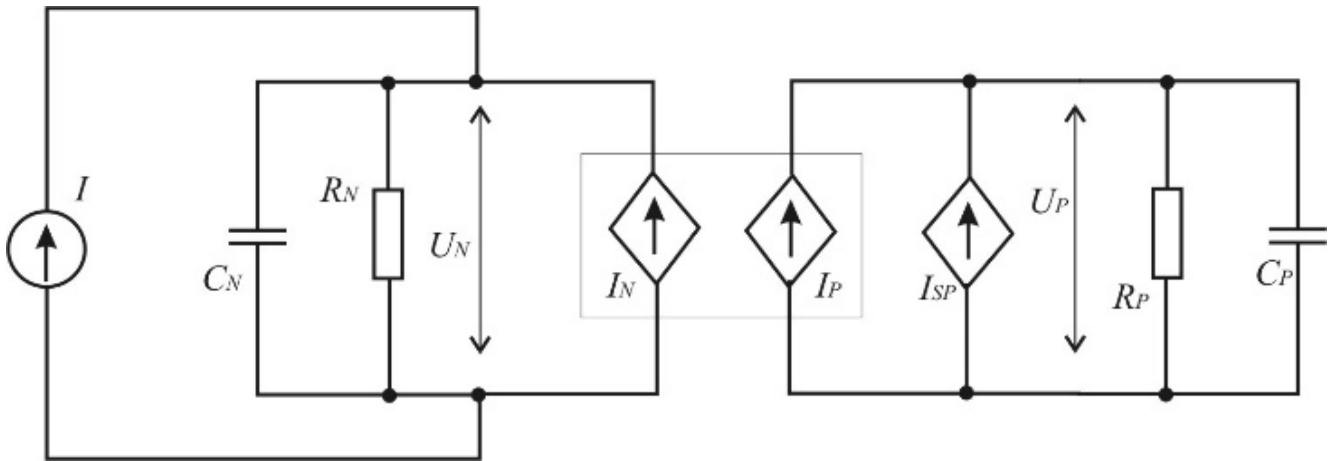


Рис. 2. Електрична модель напівпровідникового лазера

Fig. 2. Electrical model of semiconductor laser

впливають на динамічні характеристики фотоелемента. Це, зокрема, ємність та опір.

На рис. 2 видно, що крім активних елементів, які відповідають за генерацію фотонів, є пасивні елементи, які впливають на динамічні характеристики напівпровідникового лазера, такі як ємності та опори.

Електричні моделі, представлені на рис. 1 та рис. 2, описуються системою диференціальних рівнянь в електричних параметрах:

$$I_S = C_S \frac{dU_S}{dt} + \frac{U_S}{R_S}; \quad (4)$$

$$C_N \frac{dU_N}{dt} = I - \frac{U_N}{R_N} - I_N; \quad (5)$$

$$C_P \frac{dU_P}{dt} = I_P - \frac{U_P}{R_P} + I_{SP}, \quad (6)$$

де U_S – напруга, яка моделює генерацію носіїв заряду в фотоелементі, U_N – напруга, яка моделює наявність носіїв заряду в активній зоні лазера, U_P – напруга, яка моделює густину фотонів в активній зоні лазера, C_S – ємність, яка моделює накопичення носіїв заряду в фотоелементі, C_N – ємність, яка моделює накопичення носіїв заряду в активній зоні лазера, C_P – ємність, яка моделює накопичення фотонів у активній зоні лазера, R_S – опір, який моделює релаксаційні процеси у фотоелементі, R_N – опір, який моделює релаксаційні процеси носіїв у активній зоні лазера, R_P – опір, який моделює втрату фотонів у активній зоні лазера, I – струм живлення лазера, I_S – кероване джерело струму, яке моделює надходження фотонів у фотоелемент, I_N та I_P – керовані джерела струму, які моделюють генерацію фотонів у активній зоні лазера, I_{SP} – кероване джерело струму, яке моделює спонтанну генерацію фотонів у лазері.

Експериментальне дослідження. На рис. 3 представлена схема для проведення експериментального дослідження. Вона складається з джерела живлення лазера, напівпровідникового лазера та модулятора, який безпосередньо на лазер подає імпульси частотою 1 КГц.

Модуляція напівпровідникового інжекційного лазера здійснювалась за допомогою генератора прямокутних імпульсів та MOSFET-транзистора. Також схема містить фотоприймач, який і є предметом дослідження, та двоканальний осцилограф з відповідними частотними характеристиками.

Крім того, треба зазначити, що когерентне випромінювання лазера мало довжину хвилі 808 нм, що є сприятливим для поглинання в монокристалічному кремнії, оскільки діапазон спектра поглинання кремнію, завдяки ширині забороненої зони та іншим властивостям, збігається з такою довжиною хвилі [10].

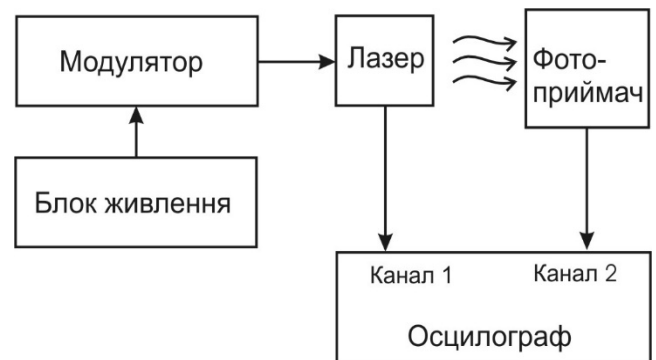


Рис. 3. Установка для експериментального дослідження динамічних процесів у фотоелементі

Fig. 3. Installation for experimental research of dynamic processes in PV-cell

Було проведено шість експериментів для фотоелемента та двох фотопанелей (рис. 4). Експерименти проводились з різною концентрацією лазерного променя: розсіяного по фотоелементу чи панелі та концентрованого у вузький промінь. Результати експериментальних досліджень зображені на рис. 5–9 у вигляді осцилограм, де верхнім сигналом є значення напруги на напівпровідниковому лазері, а нижнім сигналом – значення напруги на виводах фотоеле-



Рис. 4. Приклади фотоелемента (зліва) та панелей (посередині та справа), з якими проводились дослідження

Fig. 4. Examples of PV-cell (left) and PV-panels (center and right) to research

мента або панелі. Амплітудні та частотні значення містяться на фотозображеннях осцилограм (внизу та вгорі фотографій).



Рис. 5. Імпульси на лазері та фотоелементі

Fig. 5. Pulses on laser and pv-cell



Рис. 6. Імпульси на лазері та фотопанелі 10 Вт при концентрованому промені

Fig. 6. Pulses on laser and on pv-panel 10 W and concentrated beam

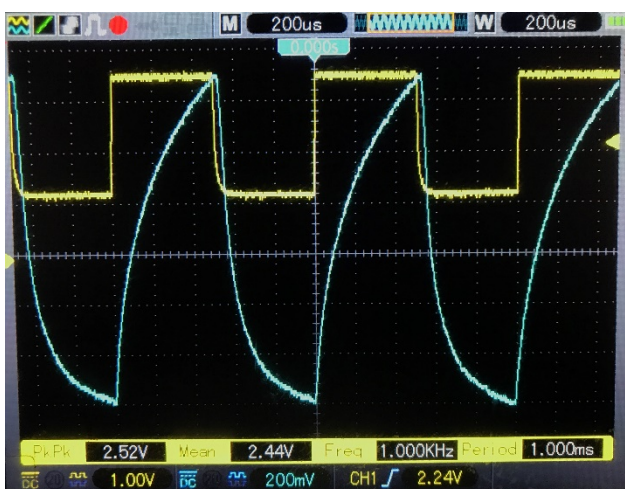


Рис. 7. Імпульси на лазері та фотопанелі 10 Вт при розсіяному промені

Fig. 7. Pulses on laser and on pv-panel 10 W and dispersed beam



Рис. 8. Імпульси на лазері та фотопанелі 70 Вт при концентрованому промені

Fig. 8. Pulses on laser and on pv-panel 70 W and concentrated beam



Рис. 9. Імпульси на лазері та фотопанелі 70 Вт при розсіяному промені

Fig. 9. Pulses on laser and on pv-panel 70 W and dispersed beam

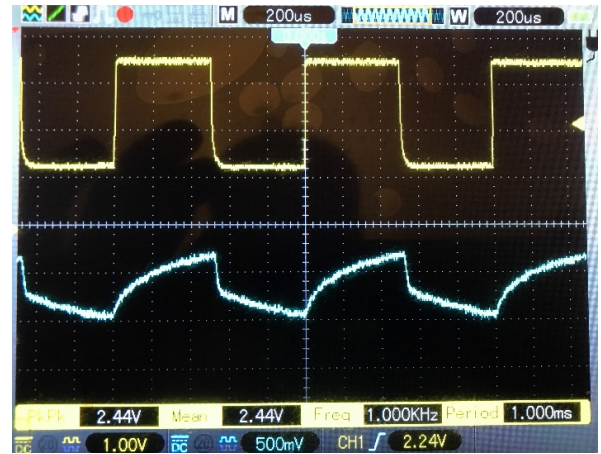


Рис. 10. Імпульси на лазері та фотопанелі 70 Вт (при концентрованому промені та додатковому сонячному опроміненні)

Fig. 10. Pulses on laser and on pv-panel 70 W (concentrated beam and additional solar irradiation)

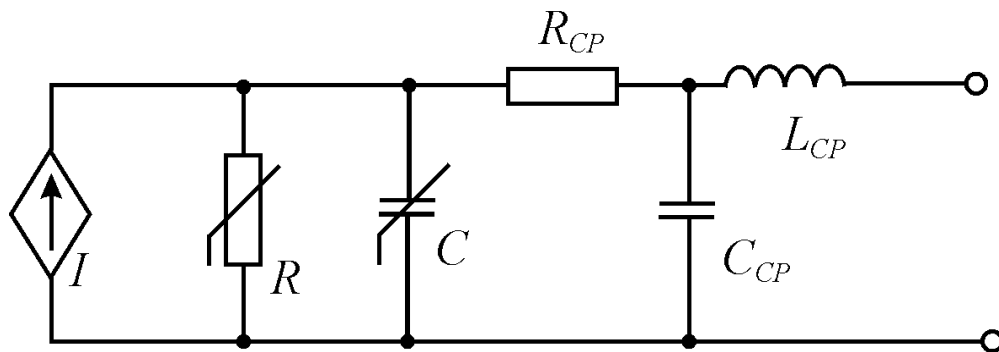


Рис. 11. Електрична модель сонячного фотоелемента з паразитними елементами

Fig. 11. Electrical model of solar PV-cell with parasitic elements

Висновок. Базуючись на вищевикладеному теоретичному підґрунті та на отриманих експериментальних результатах, можна зробити такі висновки. По-перше, наявність накопичувальних та релаксаційних процесів у напівпровідниковому лазері та фотоелементі, що моделюється наявністю конденсаторів та резисторів у електричних моделях, приводять до появи фронтів на імпульсах. Осцилограма імпульсу на фотоелементі (рис. 5), саме й показує обидва ці процеси разом. По-друге, зміна опромінення одиночного фотоелемента з концентрованого на розсіяне по всьому елементу не привела до змін форми імпульсів. По-третє, при опроміненні фотопанелей концентрованим променем (рис. 6, рис. 8) форма електричного імпульсу на виводах фотопанелі не є такою вираженою порівняно з імпульсом при опроміненні всієї панелі розсіяним променем (рис. 7, рис. 9), а саме зріз імпульсу затягується приблизно на 200 мкс. Такий ефект пояснюється тим, що при розсіяному опроміненні всієї панелі всі її елементи беруть участь у генерації та не є додатковим навантаженням, як було у випадку опромінення концентрованим променем тільки одного елемента в панелі й затіненням інших. Підтвердженням такої ідеї є те, що при додатковому

опроміненні фотопанелі традиційним сонячним світлом форма імпульсу також є більше вираженою, і зріз імпульсу коротший на ті самі 200 мкс. Це позитивно впливає на демодуляцію вихідного сигналу сонячної панелі та детектування інформаційного потоку з послідовності імпульсів (рис. 10). Зазначимо, що на рис. 10 ціна поділки напруги сигналу на фотоелементі – 500 мВ, а не 200 мВ, як на попередніх рисунках.

По-четверте, при концентрованому опроміненні великих фотопанелей значний вплив на форму імпульсу починають створювати паразитні елементи самої фотопанелі [11], що значно погіршує таку форму в частині затягування переднього і заднього фронтів. А саме 70 % амплітуди вихідного сигналу досягається через 200 мкс та 300 мкс, відповідно, в залежності від конструкції фотопанелі (рис. 6, рис. 8). Такі паразитні елементи відображаються на електричній моделі фотоелемента чи фотобатареї (рис. 11), що дає змогу проводити повне моделювання таких панелей.

Таким чином, отримані результати динамічної поведінки фотоелементів і фотопанелей дозволяють проводити розробку та впровадження пристроїв в енергетиці та електроніці з використанням когерентного

випромінювання, що актуально з огляду на проблеми, зазначені у вступній частині.

ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко Д. В. Сонячні фотоелектричні модулі під дією когерентного опромінення. Відновлювана енергетика. 2017. № 2. С. 59–62.
2. Бондаренко Д. В. Моделирование динамического поведения инжекционного лазера при проектировании оптических систем связи. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 1999. № 5-6. С. 44–45.
3. Ривлин Л. А., Семенов А. Т., Якубович С. Д. Динамика и спектры излучения полупроводниковых лазеров / Под ред. Л. А. Ривлина. М.: Радио и связь. 1983. 208 с.
4. Елисеев П. Г. Введение в физику инжекционных лазеров. М.: Наука. 1983. 294с.
5. Крюков П. Г., Летохов В. С. Распространение импульса света в резонансно усиливающей (поглощающей) среде. Успехи физических наук 1969. Т. 99. Вып. 2. С. 169–227.
6. Полупроводниковые инжекционные лазеры: динамика, модуляция, спектры. Пер. с англ. / Под ред. У. Тсанга. М.: Радио и связь. 1990. 320 с.
7. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / Пер. з англ. Под ред. М. М. Колтуна. М.: Энергоатомиздат. 1987. 280 с.
8. Katz J., Margalit S., Harder C., Wilt D., Yariv A. The intrinsic electrical equivalent circuit of a laser diode. IEEE Journal of Quantum Electronics. 1982. Vol. QE-18. P. 4–7.
9. Dmitry V Bondarenko Use of electrical equivalent circuits at simulation optoelectronic systems. 5th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (Proceedings of LFNМ), 2003. P. 72–74.
10. Green M. A., Keevers M. J., Optical properties of intrinsic silicon at 300 K, Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 1995. Vol. 3. P. 189–192.
11. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / К. В. Безручко, Н. В. Белан, Д. Г. Белов, С. В. Губин, В. И. Драновский, В. С. Кравцов, И. Т. Перекопский, И. Б. Туркин / Под ред. акад. НАН Украины С. Н. Конюхова. Харьков: Государственный аэрокосмический университет «ХАИ». 2000. 515 с.

REFERENCES

1. Bondarenko D. V. Soniachni fotoelektrychni moduli pid dieyu kogerentnogo oprominennia [Solar photocells irradiated by coherent radiation]. Renewable energy. 2017. No. 2. P. 59–62 [in Ukrainian].
2. Bondarenko D. V. Modelirovanie dinamicheskogo povedeniya injeksionnogo lasera pri proektirovanii opticheskikh system svyazi [Simulation dynamic behavior of injection laser in the design of optical communication systems]. Technology and design in electronic equipment, 1999. No. 5-6. P. 44–45 [in Russian].
3. Rivlin L. A., Semenov A. T., Yakubovich S. D. Dinamika I spektry izlucheniya poluprovodnikovyyh laserov [Dynamics and emission spectra of semiconductor lasers] /Moscow. 1983. 208 p. [in Russian].
4. Eliseev P. G. Vvedenie v fiziku injeksionnyh laserov [Introduction to the physics of injection lasers]. Moscow. 1983 [in Russian].
5. Kryukov P. G., Letokhov V. S. Raspostraneniye impulse sveta v pezonansno usilivayushchey (pogloshchayushchey) srede [Propagation of a light pulse in a resonantly amplifying (absorbing) medium]. Uspekhi fizicheskikh nauk 1969 Vol. 99, Issue 2. P. 169–227 [in Russian].
6. Tsang W. Poluprovodnikovye injeksionnye lasery: dinamika, modulatsiya, spektry [Semiconductor injection laser. Dynamics, modulation, spectrum]. Moscow. 1990 [in Russian].
7. Fahrenbruch A., Bube R. Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion. New York, 1983.
8. Katz J., Margalit S., Harder C., Wilt D., Yariv A. The intrinsic electrical equivalent circuit of a laser diode // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1982. Vol. QE-18. P. 4-7.
9. Dmitry V Bondarenko Use of electrical equivalent circuits at simulation optoelectronic systems. 5th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (Proceedings of LFNМ). 2003. P. 72–74.
10. Green M. A., Keevers M. J. Optical properties of intrinsic silicon at 300 K. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 1995. Vol. 3. P. 189–192.
11. Bezruchko K. etc. Solnechnye energosistemy kosmicheskikh apparatov. Fizicheskoe I matematicheskoe modelirovanie [Solar energy system of space devices. Physical and mathematical modeling]. Kharkov: State space univ. "KhAI", 2000. 515 p. [in Russian].