

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАНАРНИХ ХУ-ГРАДІЄНТНИХ ФОТОВОЛЬТАІЧНИХ СТРУКТУР

Ю. Савоченко

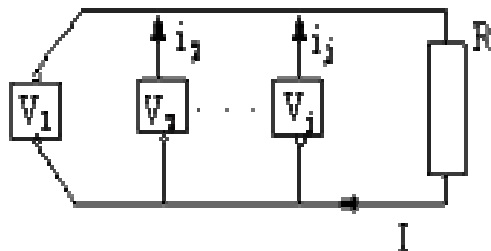
Закарпатський державний університет, Ужгород
e-mail: ysavochenko@gmail.com

В роботі представлено дані моделювання планарної х-у-градієнтної фотовольтаїчної структури та дослідження ефективності її використання у сонячній енергетиці. Модель враховує різні фізичні параметри матеріалів градієнтних структур та спосіб їх отримання. Проведено числові розрахунки ККД ху-градієнтних структур для різних комбінацій контактуючих матеріалів (Si, Ge, GaP) у порівнянні з традиційними на основі кремнію.

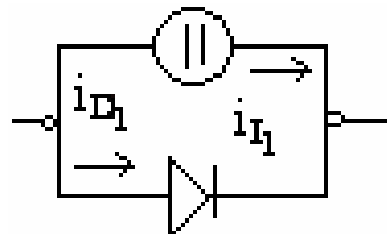
Вступ

Відомо, що пряме перетворення світлової енергії у електричну відбувається в дискретних напівпровідникових р-n, р-i-n, n+-n, р+-р переходах, або ж у структурах типу метал-діелектрик. У роботі [1] показана можливість використання з цією метою градієнтних структур діелектрик-

напівпровідник-метал, що утворюються при створенні градієнту металу вздовж (ху-структури), або ж перпендикулярно (z-структури) площині плівки. Такі структури мають назву варізонних і представляють собою сукупність контактуючих гетеропереходів з різними значеннями ширини забороненої зони.



а



б

Рис. 1. Еквівалентна схема всієї градієнтної х-структури (а) та її елементарний сегмент з параметрами моделювання (б).

Однією з причин використання гетеропереходів є можливість отримати високоефективну інжекцію неосновних носіїв у вузькозонний напівпровідник - суперінжекцію, коли концентрація інжектіваних в базу носіїв може на декілька порядків перевищити їх рівноважне значення в емітерній області.

В даній роботі наведено імітаційну модель для дослідження ефективності

планарних сонячних елементів на основі градієнтних ху-структур. Вона реалізована з використанням теорії вентиляльної фото-е.р.с. з врахуванням різних електрофізичних властивостей контактуючих напівпровідникових матеріалів. Така градієнтна структура моделюється набором р-n переходів, що враховує зміну забороненої зони (варізонність) функціональної структури вздовж підкладки, а

спектр сонячного випромінювання, - відповідно, спектром випромінювання абсолютно чорного тіла [2]. Обране середовище програмування для запропонованої імітаційної моделі містить комбінацію декількох найважливіших блоків: високопродуктивний компілятор в машинний код, об'єктно-орієнтована модель компонент, візуальна і швидкісна побудова програм з програмних прототипів, а також засоби, що масштабуються для побудови баз даних.

Представлено дані дослідження закономірностей впливу електрофізичних параметрів градієнтних структур на їх ефективність як сонячних елементів, ролі випадкових факторів, пов'язаних з кінетикою носіїв заряду. Предметом дослідження є фото-е.р.с. ху-структури, ККД для різних параметрів діодно-генераторних ланцюжків, значень градієнтів цих параметрів. Наведено дані числового моделювання для різних композицій напівпровідників Si, Ge та GaP вздовж площини варізонної структури.

Теорія та результати розрахунку

Варізонний напівпровідник можна розглядати як функціональну структуру з розподіленими параметрами. При моделюванні такої структури з градієнтом компонент вздовж поверхні (ху-градієнтна структура) скористаємося еквівалентною схемою рис. 1, що містить N паралельно з'єднаних генераторно-діодних ланцюжків V_j , $j=1, N$, струму, обумовленого інжекцією фотодірок (електронів), i_{Dj} - тунельний струм, $i_{Dj}=i_{Sj}(\exp(\alpha U_j)-1)$, i_{Sj} - струм насичення в j -ланцюжку, $\alpha = 1/kT$, а U_j , - напруга для елементарного ланцюжка. Для зовнішнього кола, що містить опір R , струм дорівнює I . Оскільки сполучення ланцюжків паралельне, мають місце наступні залежності між параметрами моделі:

$$\sum_{j=1}^N i_j = I, U_1 = U_2 = \dots = U_j = \dots = U \quad (1)$$

Параметри моделювання мають описувати наступні фактори:

- склад та властивості напівпровідника в кожній точці градієнтної структури, наприклад, через ширину забороненої зони E_g , коефіцієнт відбивання R , інтенсивність поверхневої генерації фотодірок (електронів), їх долю, що дійшла до потенціального бар'єру β , а також площу фотоелемента S ;
- спектральний склад сонячного випромінювання, що надходить на фотоелемент, його інтенсивність, яку будемо характеризувати темпом генерації фотоносіїв струму G_s , $G_s = g_s S$;
- процедуру оптимізації параметрів (опорів, струмів) зовнішньої та внутрішньої ділянок кола (рис. 1 а) для досягнення максимального ККД.

Предметом дослідження буде ККД η , такої структури, який визначається звичайним чином:

$$\eta = P_m / P_0, \quad (2)$$

де P_m - корисна потужність у зовнішньому колі x -структури, а P_0 , відповідно, та, що надходить на фотоелемент. З врахуванням градієнтів параметрів моделювання величини P_m , P_0 мають вигляд:

$$P_m = kT \sum_{j=1}^N \beta_j G_s^j f^j(z_m)$$

$$P_0 = \sum_{j=1}^N \frac{G_s^j E_g^j}{(1-R_j) \varphi^j(x_1)}$$

У приведенному виразі для P_0 , враховане припущення, що спектр сонячного випромінювання може бути апроксимований спектром випромінювання абсолютно чорного тіла, що дає вираз для:

$$\varphi^i(x_1) = x_1^i \frac{\int_{x_1}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1}}{\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1}}$$

тут $x_1^j = E_g^j / kT_1$, $kT_1 = 0,5$ еВ, а E_g^j - значення забороненої зони для j сегмента фотоелемента. Функція ж $f^j(z_m) = f(z_m)$ для паралельного сполучення функціональних ланцюжків, а у випадку оптимізації параметрів зовнішнього та внутрішнього кола на рис. 1 має вигляд [3]:

$$f(z_m) = \frac{y_m^2}{z(1+z-y_m)},$$

де y_m - корінь наступного трансцендентного рівняння:

$$(1+z-y_m) \ln(1+z-y_m) = y_m, \\ (0 \leq y_m \leq z),$$

а приведені значення струмів в ланцюжку $i(y)$ та світлового $i_s(z)$ мають вигляд:

$$y = i/i_s, \quad z = i_0/i_s.$$

Остаточно формула для знаходження ККД η (2) у випадку градієнтної структури має наступний вигляд:

$$\eta = \frac{kT \sum_{j=1}^N \beta_j G_s^j f^j(z_m)}{\sum_{j=1}^N \frac{G_s^j E_g^j}{(1-R_j) \phi^j(x_1)}} \quad (3)$$

Вираз (3) і буде вихідним для проведення числового моделювання. В подальшому розглянемо різні вихідні умови для модельної варізонної структури: комбінації напівпровідникових матеріалів, характер градієнта компонент, тощо. В даній роботі обмежимося наступними напівпровідниками для отримання варізонних структур: кремній Si, ($E_g = 1.1$ еВ), германій Ge

($E_g = 0.7$ еВ) та фосфід галію GaP ($E_g = 2.2$ еВ), що перекривають спектральний діапазон 0.7–2.2 еВ. Розглянемо також два способи формування градієнтної структури:

1. Лінійний градієнт компонент.

Вважаємо, що вздовж площини на сегментах x_j реалізується наступний градієнт концентрацій компонент A та B : $A_x B_{1-x}$, що приводить до утворення варізонної структури з параметрами:

$$E_g(x) = E_{gB} + (E_{gA} - E_{gB}) x_j, \quad (4)$$

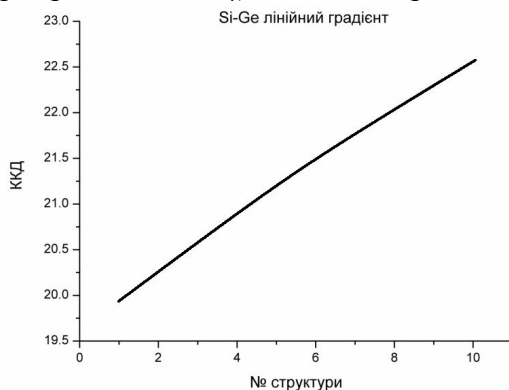
де $x_j = j/N$, j – номер сегменту варізонної структури вздовж підкладки, $0 < x_j < 1$.

2. Квадратичний градієнт компонент. У цьому випадку також реалізується градієнт компонент вздовж підкладки $A_x B_{1-x}$, проте замість (4) вибирається наступна залежність:

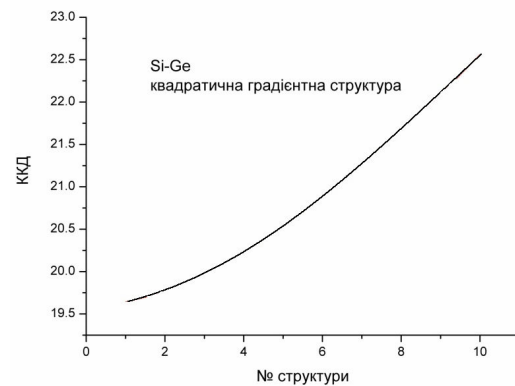
$$E_g(x) = E_{gB} + (E_{gA} - E_{gB}) x_j^2, \quad (5)$$

як і в попередньому випадку $0 < x_j < 1$.

Легко бачити, що реалізація градієнтів (4), (5) приводить до того, що напівпровідник з більшою шириною забороненої зони плавно переходить у напівпровідник з меншою шириною забороненої зони, тобто на початку і на кінці структури будуть значення величини забороненої зони E_{gA} та E_{gB} . З фізичної точки зору це відображає закон розчинення одного напівпровідникового матеріалу в іншому.



а



б

Рис. 2 Дані оцінки ККД планарних градієнтних фотовольтаїчних структур: германій-кремній для лінійного градієнта концентрацій (а); германій-кремній для квадратичного градієнта концентрацій (б).

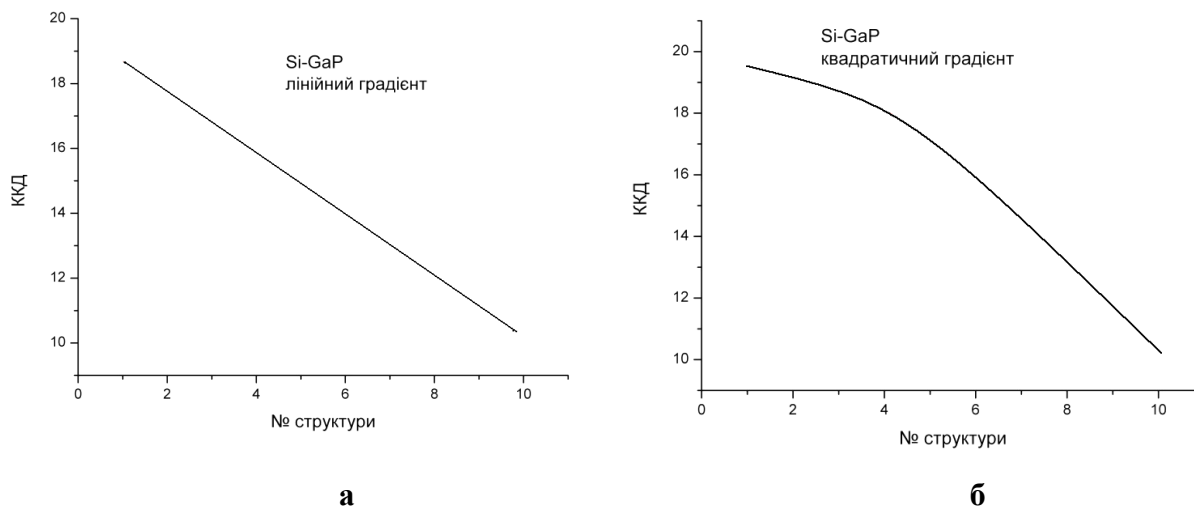


Рис. 3. Дані оцінки ККД планарних градієнтних фотовольтаїчних структур: германій-фосфід галію для лінійного градієнта концентрацій (а); германій-фосфід галію для квадратичного градієнта концентрацій (б).

На рис.2 та 3 наведено дані розрахунку ККД для модельних x -градієнтних структур А-В, де А, В=Si, Ge, GaP у припущенні наявності градієнта лише для значення ширини забороненої зони, тоді як приймалося, що $R=0$, $\beta=1$. Звертає увагу монотонна залежність ККД від вмісту компонент, причому найбільше значення досягається у випадку Ge-місткої структури. Це пояснюється найменшим значенням E_g для цього матеріалу, коли поглинається практично вся частина сонячного спектру. Відміна концентраційної поведінки ККД для лінійного та квадратичного градієнта концентрацій Ge пояснюється особливістю співвідношення компонент для планарної сполуки A_xB_{1-x} , що відображено у виразах (4) і (5).

Такі ж закономірності ще більш виражені для комбінацій Ge- GaP, що можна спостерігати на рис. 3.

Слід зауважити, що врахування більш реалістичної картини взаємодії випромінювання з речовиною можуть внести корективи до простих залежностей, наведених на рис. 2 та 3. Так, збільшення металічних властивостей плівки (зменшення E_g) приводить до росту R, на практиці складними є залежності параметрів β

та g_s від концентрації компонент градієнтних структур, що може змінити монотонні залежності ККД від способу реалізації градієнтної структури.

Висновки

Проведене дослідження засвідчило можливість моделювання градієнтних плівок через функціональні структури з розподіленими параметрами. Зокрема, планарні x -структури як набір p - n переходів, що мають різні значення забороненої зони. Такий підхід є ефективним для прогнозування параметрів ефективності варізонних фотовольтаїчних структур, що містять матеріали з різними електрофізичними властивостями. Проведені в роботі оцінки засвідчили можливість реалізації сонячних елементів з використанням різних комбінацій напівпровідників Si, Ge та GaP. Для отримання більш точних оцінок їх параметрів ефективності як ККД, фотерс слід враховувати особливості втрат енергії при відбиванні світла, розсіюванні носіїв струму тощо.

Автор вдячний В.Т. Маслоку за консультації при виконанні даної роботи.

Література

1. Шовак І.І., Мигoliniнець І.М., Попович І.І., Бобонич Е.П. Технологічні засоби і пристрої одержання градієнтних плівок., Праці Українського Вакуумного товариства, 1995, т.1, с.104-106.
2. Годжаев Н.М. Оптика, М., Высшая школа, 1977, 425 С.
3. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.П. Физика полупроводников, М., Наука, 1977, 665 С.

RESEARCH IN PERFORMANCE OF THE PLANAR XY-GRADIENT PHOTOVOLTAIC STRUCTURES

Y. Savochenko

Transcarpatian State University, Uzhhorod

e-mail: ysavochenko@gmail.com

In this article we present the x-y gradient photovoltaic structures mathematical model and data of the solar elements efficiency coefficient calculations. The model is take into account the different physical parameters the materials of gradient structures and the components distribution. The results of numerical calculations of such planar xy-gradient (Si, Ge, GaP) photovoltaic structures in comparison with the Si-traditional one has been presented.

