



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 110075

(13) C2

(51) МПК

G01N 21/27 (2006.01)

H01L 31/18 (2006.01)

H02S 50/10 (2014.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(21) Номер заявки:	а 2014 07291	(72) Винахідник(и):	Литвиненко Сергій Васильович (UA), Манілов Антон Ігорович (UA), Скришевський Валерій Антонович (UA)
(22) Дата подання заявки:	01.07.2014	(73) Власник(и):	КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА, вул. Володимирська, 64, м. Київ, 01061 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід:	10.11.2015	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:	WO 2010/107616 A2, 23.09.2010, UA 96545 C2, 10.11.2011, WO 2010/057935 A1, 27.05.2010, Litvinenko S.V. Nondestructive diagnostics of solar cells in modules and batteries by means of modulated optical beam-induced photovoltaic signal // Solar Energy Materials & Solar Cells. - 2003. - Vol. 77. - P. 369-376. WO 2011/0246109 A1, 06.10.2011, US 2012/0313661 A1, 13.12.2012, CN 103597341 A, 19.02.2014, US 2011/0127992 A1, 02.06.2011, US 2013/0194564 A1, 01.08.2013,
(41) Публікація відомостей про заявку:	27.10.2014, Бюл.№ 20		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	10.11.2015, Бюл.№ 21		

(54) СПОСІБ ТЕСТУВАННЯ ФОТОЧУТЛИВИХ БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУР

(57) Реферат:

Винахід належить до методів діагностики напівпровідникових пристроїв у галузі напівпровідникової промисловості, мікроелектроніки та сонячної енергетики. Винахід може бути застосованим для тестування і діагностики багатошарових напівпровідникових структур на підприємствах мікроелектронного профілю, при виробництві та в період експлуатації. Спосіб тестування фоточутливих багатошарових структур полягає у реєстрації фотоелектричного відгуку багатошарової напівпровідникової структури на послідовність оптичних імпульсів, довжини хвиль яких відповідають спектральним діапазонам поглинання у кожному з напівпровідникових шарів. Виміряні залежності величини фотоелектричного сигналу від наскрізного електричного струму інтегруються чисельними методами. Це дозволяє відтворити вольт-амперні характеристики окремих шарів напівпровідникової структури без потреби у руйнуванні пристрою або створенні додаткових контактів. Технічним результатом винаходу є можливість тестування фоточутливих структур, які складаються з багатьох напівпровідникових шарів, відтворення вольт-амперних характеристик окремих шарів фоточутливих багатошарових елементів.

UA 110075 C2

Винахід належить до методів діагностики напівпровідникових пристроїв у галузі напівпровідникової промисловості, мікроелектроніки та сонячної енергетики. Винахід може бути застосованим для тестування і діагностики багатошарових напівпровідникових структур на підприємствах мікроелектронного профілю, при виробництві та в період експлуатації. Зокрема

для сонячних модулів, фотоприймачів, світловипромінюючих пристроїв, тощо.

Класичними способами тестування фоточутливих елементів є вимірювання їх вольт-амперних характеристик (ВАХ) та реєстрація спектральних залежностей наведеного фотоелектричного сигналу [1-2]. Вони дозволяють визначити експлуатаційні показники пристроїв.

Дієвим засобом підвищення ефективності фото чутливого елемента є створення багатошарових структур. Принцип дії такого пристрою полягає у розширенні спектрального діапазону ефективного поглинання світла структурою за рахунок пропускання променів через послідовність напівпровідникових шарів із різною шириною забороненої зони - від найбільшої у верхньому шарі, до найменшої в останньому. У такий спосіб досягається ступінчата зміна краю поглинання, що призводить до проходження світла крізь всю гетероструктуру із поглинанням у кожному зі складових шарів. При цьому, властивості шарів підібрані так, щоб їх діапазони поглинання перекривались, охоплюючи в сумі весь спектральний діапазон видимого сонячного випромінювання.

Недоліком класичних способів є здатність тестування лише модуля в цілому, а не його компонент. У сучасних фоточутливих елементах на основі багатошарових структур виникає необхідність у визначенні внеску кожного шару у загальну ефективність пристрою. Відповідно, постають задачі отримати характеристики окремих шарів елемента, виявити дефектні складові.

Першим аналогом до заявленого винаходу є спосіб визначення ефективності сонячної панелі та виявлення дефектів шляхом багаторазового оптичного сканування [3]. При цьому вимірюється просторовий розподіл фотоструму вздовж поверхні модуля. Реєстрація розподілу ведеться за допомогою світлоклапанного індикатора.

Недоліком першого аналога є неможливість відтворення розподілу ВАХ елементів, оскільки реєструється тільки фотострум окремих компонент, нездатність до виділення сигналу від окремих шарів для випадку багатошарової структури, застосовність способу лише до сонячних батарей.

Другим аналогом до заявленого винаходу є спосіб виявлення локальних дефектів у напівпровідникових пластинах [4]. Для цього формується середовище у вигляді тонкого прозорого шару рідини між скляною пластиною і поверхнею напівпровідникової пластини, яка підключається до джерела електричного живлення. Дефекти в напівпровідниковій пластині виявляють візуально в місцях появи сплюснутих газових бульбашок в тонкому шарі прозорої рідини.

Недоліком другого аналога є неможливість відтворення електричних параметрів елементів пристрою, оскільки здійснюється лише візуальний контроль за дефектними компонентами.

Третім аналогом до заявленого винаходу є спосіб вимірювання ефективності, з якою сонячний елемент перетворює енергію падаючих фотонів в носії заряду [5]. Для цього застосовується зниження інтенсивності освітлення у обраному діапазоні довжин хвиль, після чого визначається зміна кількості фотонів, які падають на елемент і зміна числа носіїв заряду, що використовується для обчислення квантової ефективності. Тобто реалізується режим освітлення із змінним діапазоном довжин хвиль, при яких проводиться тестування.

Недоліком третього аналога є потреба у додаткових референтних вимірах із широкосмуговим джерелом світла, нездатність до виділення сигналу від окремих шарів для випадку багатошарової структури.

Найбільш близьким до заявленого способу по суті є метод діагностики сонячних елементів у модулях шляхом вимірювання електричного відгуку на модульованому освітленні [6]. Метод полягає у вимірюванні і наступній математичній обробці малого сигналу, наведеного при освітленні кожного елемента сонячної батареї модульованим світлом. Одержання темної ВАХ елемента виконується у два етапи: (а) модульоване освітлення елемента із вимірюванням електричного відгуку, пропорційного похідній від ВАХ, (б) обчислення коефіцієнтів пропорційності та відновлення ВАХ інтегруванням.

Основними недоліками наведеного способу-прототипу є застосовність для одношарових сонячних модулів, неможливість виділення ВАХ окремих шарів у випадку багатошарової структури.

В основу винаходу поставлена задача розробки способу тестування багатошарових фоточутливих структур, визначення вольт-амперних характеристик окремих шарів

фоточутливих багатошарових елементів, без розбирання і руйнування пристрою, та без створення додаткових контактів для тестування.

Поставлена задача вирішується тим, що модульоване освітлення багатошарового елемента, який тестується, здійснюється із покроковою зміною довжини хвилі від верхніх до нижніх (або навпаки) граничних значень у межах робочого спектрального діапазону пристрою. Завдяки цьому, на початку тестування процеси поглинання світла будуть проходити тільки у шарі із найменшою шириною забороненої зони, створюючи на виході пристрою фотоелектричний сигнал від даного шару. Для інших шарів, енергія фотонів початкового освітлення буде нижча краю поглинання. При зменшенні довжини хвилі, поглинання буде послідовно активуватися у наступних шарах із більшою шириною забороненої зони. У такий спосіб можна розділити внесок кожного із складових шарів у вихідний фотоелектричний сигнал. Виділення фотоелектричного відгуку кожного шару дає можливість відтворити їх вольт-амперні характеристики. Це здійснюється математичною обробкою, а саме інтегруванням фотоелектричного відгуку, який є пропорційним до похідної від вольт-амперної характеристики.

Технічним результатом винаходу є можливість тестування фото чутливих структур, які складаються з багатьох напівпровідникових шарів, відтворення вольт-амперних характеристик окремих шарів фото чутливих багатошарових елементів.

Суть винаходу пояснюється наступними фігурами:

На фіг. 1 зображено блок-схему устаткування для вимірювання наведеного фотоелектричного сигналу із керованою зміною довжини хвилі освітлення.

На фіг. 2 показано пошарове сканування фоточутливої структури GaInP/GaAs/Ge за рахунок ступінчатої зміни довжини хвилі тестуючого освітлення. Чорні стрілки вказують фотоелектричний відгук шару, у якому відбувається поглинання світла. Довжини хвиль підбираються у відповідності до країв поглинання напівпровідникових шарів.

На фіг. 3 показано приклад експериментального відтворення ВАХ запропонованим у винаході способом для Ge фотоелемента, у порівнянні з безпосередніми вимірами темнотної і світлової ВАХ.

Заявлений спосіб реалізується наступним чином.

1. Багатошаровий напівпровідниковий елемент підключається до електричного кола, здатного підтримувати заданий постійний струм. Тобто, реалізується гальваностатичний режим. За таких умов опромінення слабким модульованим світлом призведе до генерації змінної напруги, необхідної для того, щоб наскрізний струм залишився незмінним.

2. Елемент опромінюється модульованим світлом у вузькому спектральному діапазоні, із поетапною зміною довжини хвилі від верхньої до нижньої (або навпаки) границі робочого діапазону пристрою. У більшості випадків склад багатошарового елемента є відомим. Тоді довжини хвиль тестуючого освітлення підбираються у відповідності до країв поглинання напівпровідникових шарів, що складають пристрій.

3. На кожній з довжин хвиль тестуючого освітлення реєструється фотоелектричний відгук елемента. Причому, сигнал вимірюється при різних значеннях струму в межах діапазону загальної ВАХ елемента. Амплітуда цього змінного сигналу пропорційна похідній напруги за струмом [6]. Для вимірів на цьому етапі необхідна здатність ВАХ пристрою зсуватися по осі струмів при освітленні на величину фотоструму.

4. Математична обробка виміряних даних здійснюється на основі припущення повного поглинання світла із фіксованою довжиною хвилі в одному напівпровідниковому шарі, який має відповідний край поглинання. В такому випадку отримані значення фотоелектричного сигналу можуть бути представлені функціями виду:

$$\delta v(I, \lambda) = K(I, \lambda) \cdot dV(I, \lambda) / dI \quad (1),$$

де I - сила струму у колі, V - напруга на елементі, λ - довжина хвилі освітлення, а K - коефіцієнт пропорційності. При цьому, довжина хвилі являє собою характеристику, яка визначає напівпровідниковий шар, у якому відбулося поглинання світла і фотоелектричне перетворення:

$$\lambda_n \leftrightarrow n \quad (2),$$

де n - номер напівпровідникового шару та індекс відповідного значення довжини хвилі тестуючого освітлення. У простому випадку, коефіцієнт пропорційності K є незалежним від струму та довжини хвилі:

$$K(I, \lambda) = K = \text{const} \quad (3)$$

Тоді є застосовним математичний апарат способу прототипу [12]. Відповідно, коефіцієнт розраховується з експериментальних значень фотоелектричного сигналу та похідної загальної ВАХ елемента за формулою:

$$K = \sum_{\lambda} \delta v(l, \lambda) / (dV/dl) \quad (4),$$

де підсумовування ведеться по всім довжинам хвиль тестуючого освітлення. Відновлення ВАХ окремого шару елемента здійснюється інтегруванням похідної:

$$V_n(l) = \int_0^l V'_n(i) di + V_{xx} = \int_0^l \frac{\delta v(i, \lambda_n)}{K} di + V_{xx} \quad (5),$$

де V_{xx} - постійна інтегрування, яка дорівнює нулю для темнових ВАХ, і напрузі холостого ходу при постійному освітленні.

Заявлений спосіб застосовний і для складних випадків, де поглинання світла є суттєвим одночасно у кількох шарах елемента, або коефіцієнт пропорційності похідної ВАХ має різні значення на різних довжинах хвиль чи величинах струму. Для цього необхідні вдосконалення у математичній обробці даних, проте суть застосування даного способу не зміниться.

Суть винаходу пояснюється наступними прикладами.

Багатошарова GaInP/GaAs/Ge структура виготовляється за технологією металоорганічного хімічного парового осадження [7]. Обладнання для тестування заявленим у винаході способом складається з джерела світла, системи світлофільтрів, модулятора, потенціостата та селективного нановольтметра (фіг. 1). Керування устаткуванням здійснюється з комп'ютера.

Зразок підключається до потенціостата, який подає напругу зміщення і забезпечує гальваностатичний режим вимірювань, та селективного нановольтметра, який реєструє наведений фотоелектричний сигнал на частоті модуляції. Випромінювання джерела світла проходить через керовану систему фільтрів, які забезпечують необхідну залежність довжини хвилі від часу. Для GaInP/GaAs/Ge модуля вибирається ступінчата зміна значень довжини хвилі тестуючого освітлення: 600 нм, 800 нм, 1000 нм. Така функція вибрана відповідно до ширини забороненої зони шарів: GaInP-1.8 еВ (688 нм), GaAs-1.42 еВ (873 нм), Ge-0.8 еВ (1550 нм).

Випромінювання з довжиною хвилі 600 нм поглинається у верхньому широкозонному шарі GaInP, 800 нм - у GaAs, 1000 нм - у Ge (фіг. 2). Тобто при довжині хвилі 600 нм основний фотоелектричний відгук йде з шару GaInP, при 800 нм - з GaAs, при 1000 нм - з Ge. Поглинанням у наступних шарах можна знехтувати. В результаті вимірювань отримуються диференційні ВАХ для кожного напівпровідникового шару. Після інтегрування і нормування отриманих залежностей відтворюються ВАХ окремих складових шарів сонячного елемента. Приклад відтворення ВАХ для Ge, порівняно із характеристиками, виміряними безпосередньо, показано на фіг. 3.

Отже, застосування заявленого способу тестування фоточутливих багатошарових структур дозволяє досягти заявленого технічного результату.

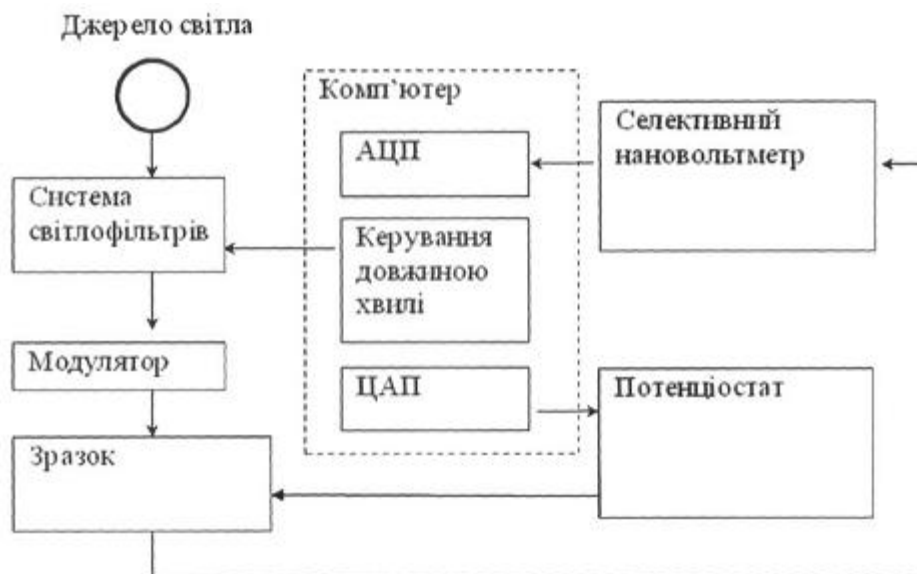
Джерела інформації:

1. Фаренбух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент. - Москва: Энергоатомиздат, 1987. - 280 с.
2. Fraas L., Partain L. Solar cells and their applications. - John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey, 2010. - 627 p.
3. Опис до патенту. WO 2010/107616. System and method for characterizing solar cell conversion performance and detecting defects in a solar cell, 2010.
4. Опис до патенту. Україна № 96545. Спосіб виявлення локальних дефектів в пластинах сонячних батарей, 2011.
5. Опис до патенту. WO 2010/057935. Method of testing solar cells, 2010.
6. Litvinenko S.V. Nondestructive diagnostics of solar cells in modules and batteries by means of modulated optical beam-induced photovoltaic signal // Solar Energy Materials & Solar Cells. - 2003. - Vol. 77. - P. 369-376.
7. Cui M., Chen N., Yang X., Zhang H. Fabrication and temperature dependence of a GaInP/GaAs/Ge tandem solar cell // Journal of Semiconductors. - 2012. - Vol. 33. - P. 024006.

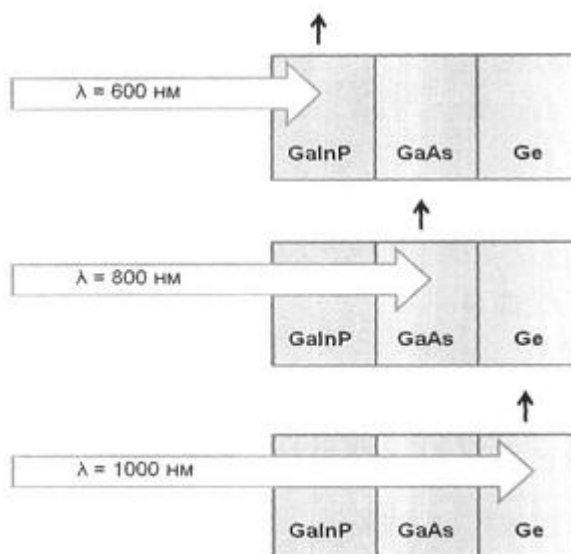
ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб тестування фоточутливих багатошарових структур з визначенням вольт-амперних характеристик окремих шарів, що включає операції їх опромінення модульованим світлом, реєстрацію та обробку наведеного фотоелектричного сигналу, який відрізняється тим, що багатошарову структуру підключають до керованого потенціостата, за допомогою якого задають електричний струм та забезпечують гальваностатичний режим вимірювань; при цьому застосовують однопроменеву систему освітлення, здатну генерувати модульоване за

- інтенсивністю опромінення різної довжини хвилі відповідно до спектрального діапазону поглинання напівпровідникових шарів структури; фотоелектричний сигнал реєструють на частоті модуляції для кожної довжини хвилі при зміні величини струму крізь багат шарову структуру; довжину хвилі світла змінюють покроково від верхніх до нижніх граничних значень або навпаки, а вольт-амперні характеристики окремих шарів визначають шляхом інтегрування по струму та нормування фотоелектричного сигналу.
- 5



Фиг. 1



Фиг. 2

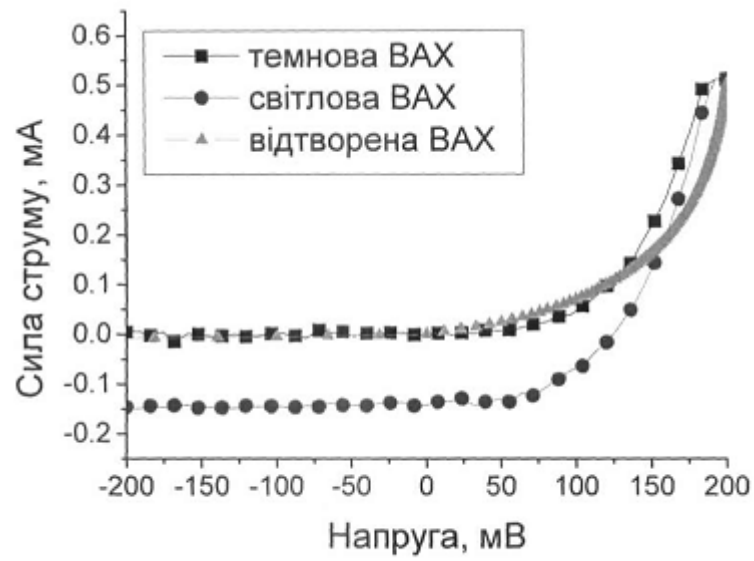


Fig. 3

Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601