

РОЗДІЛ VI. ЕНЕРГЕТИКА

УДК 681.518.5:539.87

С.О. Білокінь, канд. техн. наук

М.О. Бондаренко, канд. техн. наук

Ю.Ю. Бондаренко, канд. техн. наук

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

В.С. Антонюк, д-р техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ДІАГНОСТИЧНОГО СТЕНДА НА БАЗІ АТОМНО-СИЛОВОГО МІКРОСКОПА

С.А. Билоконь, канд. техн. наук

М.А. Бондаренко, канд. техн. наук

Ю.Ю. Бондаренко, канд. техн. наук

Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина

В.С. Антонюк, д-р техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СТЕНДА НА БАЗЕ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

Svitlana Bilokin, PhD in Technical Sciences

Maksym Bondarenko, PhD in Technical Sciences

Yuliia Bondarenko, PhD in Technical Sciences

Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

Viktor Antoniuk, Doctor of Technical Sciences

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

RESEARCH OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF DIELECTRIC SURFACES BY MEANS OF DIAGNOSTIC STAND ON THE BASE OF ATOMIC-FORCE MICROSCOPE

Розглянуто актуальне завдання розроблення методичного забезпечення для визначення механічних характеристик діелектричних матеріалів у нанометровому діапазоні. Для комплексного дослідження пружних сил, капілярних сил та визначення залишкового трибозаряду пропонується використання діагностичного стенда, який створено на базі атомно-силового мікроскопа. Розроблена та описана в роботі блок-схема стенда та схема автоматизації технологічного процесу дозволяє усунути негативні зовнішні впливи на процес діагностування з боку оператора. За результатами дослідження матеріалів, які знайшли широке використання у галузі точного приладобудування (на прикладі кремнію Кр0, оптичного скла К8 та п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19) встановлено похибку визначення їх механічних характеристик, яка не перевищує 7,5 %.

Ключові слова: діагностичний стенд, атомно-силова мікроскопія, діелектрик, пружна сила, капілярна сила, трибозаряд.

Рассмотрена актуальная задача разработки методического обеспечения для определения механических характеристик диэлектрических материалов в нанометровом диапазоне. Для комплексного исследования упругих сил, капиллярных сил и определения остаточного трибозаряда предлагается использование диагностического стенда, который создан на базе атомно-силового микроскопа. Разработанная и описанная в работе блок-схема стенда и схема автоматизации технологического процесса позволяет устранить ряд негативных внешних влияний на процесс диагностирования со стороны оператора. По результатам исследования материалов, которые нашли широкое использование в области точного приборостроения (на примере кремния Кр0, оптического стекла К8 и пьезоэлектрической керамики ЦТС-19) установлена погрешность определения их механических характеристик, которая не превышает 7,5 %.

Ключевые слова: диагностический стенд, атомно-силовая микроскопия, диэлектрик, упругая сила, капиллярная сила, трибозаряд.

In the article the actual task of development of the methodical providing is examined for determination of mechanical descriptions of dielectric materials in a nanometer range. For complex research of resilient forces, capillary forces and determination of remaining tribo-charge the use of diagnostic stand that is created on the base of atomic-force microscope is offered. The flow-chart of stand and chart of automation of technological process worked out and described in-process allow

to remove the row of negative external influences on the process of diagnosing from the side of operator. On results research of materials that found deployment in area of exact instrument-making (on the example of silicon of Kp0, optical glass of K8 and piezoelectric ceramics of ЦТС-19) the error of determination of its mechanical descriptions is set, that does not exceed 7,5 %.

Key words: diagnostic stand, atomic-force microscopy, dielectric, resilient force, capillary force, tribo-charge.

Постановка проблеми. Сьогоденні наука і техніка прагнуть до мініатюризації своїх систем і компонентів, внаслідок чого активно набуває популярності нова галузь науки – нанотехнології. Проте її розвиток неможливий без сучасних методів дослідження, а забезпечення якості технологічних процесів та систем неможливе без поліпшення фізичних характеристик матеріалів. Існує велика кількість методів дослідження, що принципово відрізняються один від одного, проте більшість цих методів мають можливість досліджувати лише рельєф поверхні. Водночас, універсальні методи, призначені для комбінованого дослідження як мікрорельєфу, так і поверхневих фізико-механічних характеристик матеріалів, є, як правило, руйнуючими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед універсальних методів дослідження матеріалів особливої уваги слід приділити сканувальній зондовій мікроскопії (СЗМ) [1]. Цей метод є універсальним, має високу роздільну здатність, а вимірювальним інструментом є зонд, який підводиться до поверхні, чим відкриває нові можливості для дослідження фізичних і механічних характеристик поверхонь на поверхневому, нанометровому рівні. Зусиллям вітчизняних та зарубіжних учених, а саме: С.А. Чижика, М.А. Журавкова, Т.А. Кузнецової, Ю.Д. Трет'якова, О.В. Свірідової, С.О. Білокінь створено теоретичні та практичні засади неруйнівного контролю та діагностування нанорельєфу різноманітних матеріалів та їх фізико-механічних характеристик із застосуванням методу СЗМ та його різновиду – методу атомно-силової мікроскопії (АСМ) [2–4].

Невирішені частини проблеми. Проте, незважаючи на явні переваги методу АСМ, відсутність методичного забезпечення та засобів його реалізації не дозволяє підвищити якість та точність визначення саме механічних характеристик поверхонь, а також застосовувати цей метод як універсальний у нетривіальних дослідницьких задачах (наприклад, встановлення залежності електропровідності тонких покриттів від зовнішнього їх навантаження). Тому розширення можливостей методу АСМ під час дослідження фізичних характеристик діелектричних поверхонь на сьогодні є питанням актуальним.

Метою дослідження є розроблення діагностичного стенда, що ґрунтується на методі атомно-силової мікроскопії та дослідження фізичних характеристик діелектричних поверхонь за допомогою такого стенда.

Використовувані матеріали та обладнання. Для досягнення поставленої мети базовим обладнанням є атомно-силовий мікроскоп NT-206 (виробник ТДВ «Мікротест-машини», м. Гомель, Білорусь), який був конструктивно дооснащений розробленою нами системою діагностування. Дослідними зразками були різні за фізичними властивостями діелектричні матеріали, що знайшли широке застосування в сучасному приладобудуванні, а саме: тонкі пластини (товщиною 0,2 мм) із кремнію Кр0, диски з оптичного скла К8 (Ø25×8 мм) та п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 (Ø50×1 мм), що бралися по три зразки кожний. Робота стенда перевірялася експериментально за таких умов навколишнього середовища: температура 22 °С, вологість 65 %. У дослідженнях використовувалися стандартні кремнієві зонди виробництва фірми MicroMash, які були модифіковані нами тонким вуглецевим покриттям [4].

Будова та принцип дії діагностичного стенда. Розроблюваний діагностичний стенд складається з трьох блоків: блок дослідження пружних сил, блок дослідження капілярних сил та блок зняття трибоелектричного заряду (рис. 1).

Блок дослідження пружних сил дозволяє здійснити проникнення зонда у зразок із зусиллям, яке задається оператором з подальшим відведенням зонда від зразка і скану-

ванням місця взаємодії зонда з поверхнею. Потім за графіком підведення-відведення і результатами сканування визначаються: локальна твердість матеріалу, модуль Юнга, коефіцієнт пружного відновлення зразка тощо.

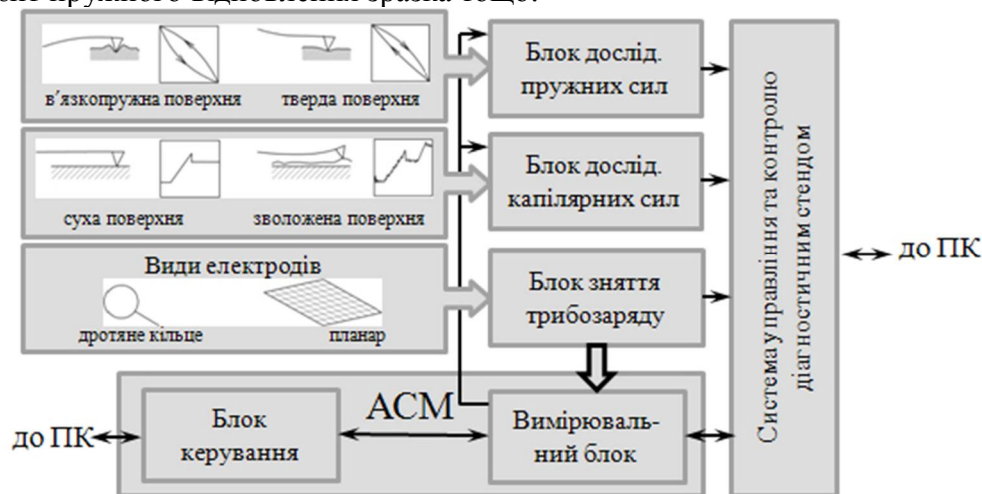


Рис. 1. Блок-схема діагностичного стенда, розробленого на основі атомно-силового мікроскопа

Блок дослідження капілярних сил призначений для дослідження сил, що виникають між зондом та плівкою рідини, яка абсорбована на досліджуваній поверхні. При такому дослідженні проводиться підведення та відведення зонда до поверхні, внаслідок чого будується графік залежності сили від відстані між зондом і зразком. За кривизною цього графіка, а також кількості піків і спадів визначається характер адсорбованої рідини, або рідин, а також товщина шару адсорбованої рідини.

Блок зняття трибоелектричного заряду призначений для фіксування заряду, що виникає внаслідок тертя зонда о діелектричну поверхню. Приймачем у цьому блоці є електроди, які можуть бути як накладеними на діелектричну поверхню у формі кільця, так і у вигляді планару – металевої сітки, нанесеної методом термовакuumного осадження на випробуваний діелектрик. Вимірювальні величини знаходяться у широкому діапазоні значень, що повністю перекриває діапазон їх теоретичних (розрахункових) значень.

Зовнішній вигляд діагностичного стенда та розробленого авторами блока системи діагностування, а також функціональної схеми роботи стенда наведено на рис. 2.

Діагностичний стенд складається з чотирьох блоків: блок керування АСМ; блок сканування АСМ; система управління діагностичним стендом; сервер збереження даних.

Основними вузлами блока керування АСМ є п'єзосканер КД1, що являє собою пристрій підведення та переміщення зразка під вимірювальним інструментом (зондом). Обмін інформацією між п'єзосканером та ПК здійснюється по інформаційному каналу ІК6, а також поступає по каналу ІК3 на пристрій діагностування. Вимірювальний інструмент закріплений у п'єзочіпі і являє собою тонку довгу консоль з голкою нанометричних розмірів (зондом) на одному з її кінців.

Під дією міжмолекулярних сил тяжіння та відштовхування у процесі підведення зразка до зонда та його сканування відбуваються горизонтальні та вертикальні відхилення цієї консолі від початкового положення, внаслідок чого на п'єзочіпі КД2 виникає потенціал певного знака та значення, що дозволяє визначити величину відхилення зонда. Отриманий сигнал з п'єзочіпа попередньо підсилюється підсилювачем ПС1 і передається каналом зв'язку ІК7 на ПК. У той же час, інформація з зонда дублюється за допомогою лазерного позиціонера КД2, що генерує висококогерентний промінь, який віддзеркалюється від консолі і далі потрапляє на чотирипозиційний фотодетектор ОУ1. При цьому кожне відхилення консолі впливатиме на зміщення цього променя відносно фотодетектора по координатам, що, у свою чергу, дозволяє встановити відхилення консолі як у ве-

ртикальній площині, так і її кручення навколо осі. Отриманий сигнал про розподіл інтенсивності лазерного променя по горизонтальній та вертикальній площині поступає по інформаційним каналам ІК1 та ІК2 на систему діагностування, а також частково на блок зворотного зв'язку ПУВ3. Отриманий сигнал з блока зворотного зв'язку та сигнал, що поступає з п'єзосканера ОУ2, компаруються та передаються на ПК по каналу ІК6.

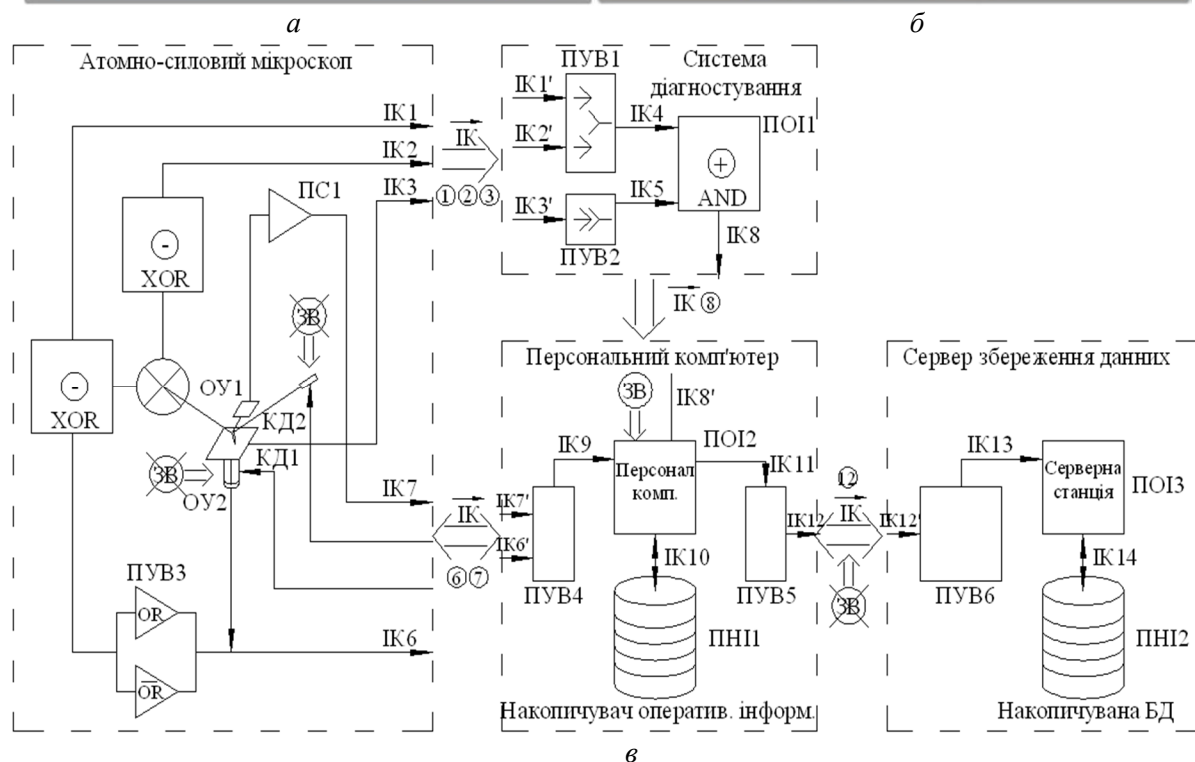


Рис. 2. Зовнішній вигляд діагностичного стенда (а), блока діагностування (б) та функціональна схема діагностичного стенда (в): 1 – блок керування АСМ; 2 – блок сканування АСМ; 3 – система управління діагностичним стендом; 4 – монітор ПК; 5 – РК-дисплей для виведення поточної інформації; 6 – вузол узгодження з ПК; 7 – вузол узгодження з АСМ; 8 – плата управління діагностичним стендом (інші пояснення – по тексті статті)

Таким чином, цей блок має сім каналів зв'язку з зовнішніми пристроями: два канали прийому (КД1, КД2) та два канали передачі (ІК6, ІК7) на ПК, а також три канали передачі на блок діагностування (ІК1-ІК3).

Блок автоматизації призначений для оперативного контролю та керування робочими режимами АСМ. Складається з таких вузлів. Вузол, призначений для узгодження сигналів, які поступають з АСМ по каналам зв'язку ІК1' та ІК2' (через пристрій узгодження ПУВ1). За допомогою інформації, що передається цими каналами, блок автоматизації формує поправки до режимів сканування АСМ (час затримки, крок сканування). Через пристрій узгодження ПУВ2, у свою чергу, поступає сигнал з каналу зв'язку ІК3', що дозволяє блоку автоматизації у процесі роботи корегувати швидкість горизонтального сканування.

Узгоджені сигнали з ПУВ1 та ПУВ2 потрапляють на пристрій оброблення інформації ПОІ1, де вони обробляються, кодуються та передаються на ПК по каналу ІК8.

Керуючий ПК є основним елементом розглянутої системи діагностування, що узгоджує роботу АСМ та блока автоматизації, формує початкові дані процесу роботи приладу, дозволяє накопичувати, обробляти, аналізувати та зберігати отримані результати. Сигнали ІК6'–ІК8' через пристрій узгодження ПУВ4 поступає до виконуючого пристрою ПОІ2, де реалізуються усі перелічені вище функції, а також за допомогою каналу ІК10 можуть зберігатися на пристрої накопичення інформації ПНІ1.

Основною перевагою використання запропонованої схеми є залучення до неї блока автоматизації, що дозволяє усунути зовнішні впливи з боку оператора (ручне налагодження системи позиціонування АСМ та ручне налаштування системи фотодетектування). Це, у свою чергу, дозволить уникнути систематичних методичних похибок, чим підвищить точність, швидкість та надійність результатів нанометричних досліджень.

Обговорення результатів досліджень. Дослідження таких фізичних характеристик поверхонь, як пружні та капілярні сили, а також залишковий трибозаряд на поверхні діелектричних зразків проводилися за допомогою вищерозробленого діагностичного стенда, а результати таких експериментальних досліджень перевірялися теоретичними розрахунками. При цьому було встановлено, що вплив, який чинили пружні сили від дії зонда на поверхню зразків, не перевищували значень 7,46–10,76 пН, тоді як значення капілярних сил знаходилися в діапазоні 110–230 пН. Значення залишкового трибозаряду на поверхні діелектричних матеріалів після повного циклу сканування поверхні становило 10,11–11,98 мКл. Отримані дані корелюють з даними, отриманими в результаті проведених теоретичних розрахунків [5–8], що підтверджує високу точність та адекватність роботи діагностичного стенда. При цьому відхилення між експериментально отриманими та теоретичними результатами не перевищує 7,5 %.

Загалом, діапазони значень основних вимірювальних характеристик та точність вимірювання діагностичним стендом зведені в табл.

Таблиця

Основні вимірювальні характеристики діагностичного стенда

Вимірювальні характеристики	Діапазон значень	Точність вимірювання, %
Трибозаряд, $\times 10^{-3}$, Кл	19...25	$\pm 2,7...5$
Капілярні сили, $\times 10^{-12}$, Н	0,2...6500	$\pm 5...7,5$
Пружні сили, $\times 10^{-12}$, Н	2...10800	$\pm 3...4,5$

Висновки. Встановлена висока точність визначення таких фізичних характеристик поверхонь, що діагностувались, як: дія пружних та капілярних сил, а також залишковий трибозаряд на діелектричних поверхнях. При цьому похибка визначення залишкового трибоелектричного заряду не перевищувала 5 %, капілярних сил – 7,5 %, пружних сил – 4,5 %. Це дозволяє зробити висновки про оперативне та якісне визначення таких фізичних характеристик діелектричних матеріалів, як: заряд, що накопичується в поверхні внаслідок тертя, капілярні сили, які виникають між вимірювальним інструментом – зондом АСМ та досліджуваною поверхнею або тонким покриттям на ній.

Значення цих сил дозволяє визначити адгезійну міцність поверхневих шарів або тонких покриттів, нанесених на поверхню. Також можуть бути визначені пружні сили, виходячи із значень яких можливе знаходження модуля пружності, коефіцієнтів тертя тощо.

У подальшому планується проводити вдосконалення діагностичного стенда з метою визначення мікротвердості, зносостійкості, а також поверхневої енергії.

Список використаних джерел

1. Binning G. Atomic force microscope / G. Binning, C.F. Quate, Ch. Gerber // Phys. Rev. Lett. – 1986. – Vol. 56. – P. 930–933.

2. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В. Л. Миронов. – Нижний Новгород : Российская академия наук, Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.

3. Микроскопія в нанотехнологіях : монографія / В. С. Антонюк [та ін.]. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 260 с.

4. Formation of wear-resistant coatings on silicon probes for atomic force microscopy by thermal vacuum evaporation / V. Antonyuk, S. Bilokin', M. Bondarenko, Yu. Bondarenko [etc.] // Journal of Superhard Materials. – 2015. – Vol. 37, Is. 2. – P. 112–119.

5. Білокінь С. О. Комплексне дослідження нанометричних елементів за допомогою атомно-силової мікроскопії / С.О. Білокінь, М.О. Бондаренко // Шевченківська весна : XII конф. (25–28 березня 2014 р.) : у 2 ч. Ч. 2. – К., 2014.

6. Билоконь С. А. Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии / С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, В. С. Антонюк // Наноинженерия. – 2012. – № 6 (12). – С. 41–45.

7. Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа / В. С. Антонюк, С. А. Билоконь [и др.] // Наноинженерия. – 2014. – № 3 (33). – С. 13–16.

8. Механізм виникнення та нейтралізація залишкової трибоелектрики при скануванні кремнієвим зондом атомно-силового мікроскопа діелектричних поверхонь / М. О. Бондаренко, С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, Ю. Ю. Бондаренко // Журнал нано- та електронної фізики. – 2014. – Том 6, № 2. – С. 02018-1–02018-5.

УДК 621.472:629.78

Р.В. Зайцев, канд. техн. наук

М.В. Кириченко, канд. техн. наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Р.В. Зайцев, канд. техн. наук

М.В. Кіріченко, канд. техн. наук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИБОРІВ

Roman Zaytsev, PhD in Technical Sciences

Mikhail Kirichenko, PhD in Technical Sciences

National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, Ukraine

THE DEVELOPMENT OF THE SEMICONDUCTOR DEVICES PARAMETERS AUTOMATION MEASUREMENT SYSTEM

Основным методом определения параметров полупроводниковых приборов является метод измерения и аналитической обработки их вольтамперных характеристик (ВАХ). Существующие на сегодняшний день измерительные комплексы для реализации этого метода представляют собой дорогие и сложные системы, которые экономически не выгодно использовать в условиях отечественного производства. В работе разработан экономичный автоматизированный измерительный комплекс ВАХ на основе микроконтроллерной системы управления с соответствующим программным обеспечением, позволяющий в связке с компьютером проводить экспрессную аттестацию фотоэлектрических преобразователей и полупроводниковых приборов по их вольтамперным характеристикам. Апробация комплекса показала его способность проводить измерения ВАХ с достаточно высокой точностью при средней погрешности измерения не больше 1 %.

Ключевые слова: полупроводниковый прибор, вольтамперная характеристика, автоматизация измерения, микроконтроллер.

Основним методом визначення параметрів напівпровідникових приборів є метод вимірювання та аналітичного опрацювання їх вольтамперних характеристик (ВАХ). Наявні нині вимірювальні комплекси для реалізації цього методу являють собою коштовні та складні системи, використання яких в умовах вітчизняної промисловості є економічно не вигідним. У роботі розроблено економічний автоматизований вимірювальний комплекс ВАХ на основі мікроконтролерної системи керування із відповідним програмним забезпеченням, що дозволяє у зв'язці із персональним комп'ютером проводити експресну аттестацію фотоелектричних перетворювачів та напівпровідникових при-