

UOT: 53.083

DOI: 10.34826/NAA.2022.24.3.009

NANOSTRUKTURLARIN EKSPERİMENTAL TƏDQİQAT SİSTEMİ

Zeynalova Ş.H.

Milli Aviasiya Akademiyası

Məqalədə çoxtəbəqəli strukturların eksperimental tədqiqi səmərəliliyinin yüksəldilməsini təmin edən üsul və vasitələrin təhlili əsasında, müvafiq ölçmə metodları, vasitələri və qurğularının köməyi ilə bu növ cihaz və strukturlar üzərində eksperimental tədqiqatların qismən avtomatlaşdırılmasını realizə etməyə imkan verən sistemin strukturu və müvafiq iş alqoritmı təklif olunmuşdur. Ölçmə vasitələri və təsirlərin yaradılması, verilənlərin emalı və təhlili, eksperimentin planlaşdırılması və qərarların qəbulu altsistemi, kompüter, verilənlər bazası və interfeysdən ibarət sistemin əsas funksiyaları və həll edəcəyi məsələlər əsaslandırılmışdır.

Açar sözlər: nanostruktur, eksperimental tədqiqatlar, yarımkeçirici, çoxtəbəqəli, foto-detektor, foto-tranzistor, avtomatlaşdırma sistemi.

Müasir yarımkeçiricilər texnologiyası həm istehsal zamanı, həm də hazır məhsulun, xüsusilə nanostrukturların tədqiq edilməsi üçün mükəmməl tədqiqat sistemlərinin və metodikalarının işlənməsini tələb edir. Bu baxımdan real qeyri-bircins çoxtəbəqəli nanostrukturların tədqiqinin metroloji təminatının yaradılması xüsusi əhəmiyyət kəsb edir.

Yarımkeçirici çoxtəbəqəli strukturların tədqiqinin mühüm vəzifəsi bu növ cihazların parametrləri və xarakteristikalarını öyrənmək, daha mükəmməl cihazların istehsalı üçün zəmin yaratmaqdan ibarətdir. İonlu legirləmə texnologiyası bu sahədə mühüm irəliləyişdir. Lakin bu zaman yarımkeçirici strukturun altlığında aşqarın paylanması bircinsliyi pozulur, bu da tədqiq edilən cihazların xarakteristikasına mənfi təsir göstərir. Bütün bunları öyrənmək və nəzərə almaq üçün bu strukturların parametrlərini, eləcə də istehsal texnologiyasını təkmilləşdirmək üçün legirlənmiş strukturların elektrik-fiziki və digər xassələrini tədqiq etmək üçün avtomatlaşdırılmış tədqiqat sisteminin yaradılması aktual məsələdir.

Fərqli optik və elektrik-fiziki parametrləri bu yeni materiallar üzərində yaradılan nanostrukturları öyrənmək, geniş funksional imkanlı cihazları tədqiq etmək nanoelektronikanın gələcək inkişafını müəyyən edən əsas istiqamətlərdən biridir.

Yarımkeçirici cihazların ölçüsünün kiçildilməsi, onların ömrünün artırılması və etibarlılığının yüksəldilməsi meyli çoxtəbəqəli, nanostrukturlu cihazların foto-detektor, foto-tranzistor və lazerlərin yaranmasına gətirib çıxarmışdır. Bu cür strukturlarda yarımkeçirici materiallarla yanaşı dielektriklər də istifadə olunur. Bu zaman müxtəlif dielektriklər kimi elə yarımkeçiricinin özündə yaradılmış oksid təbəqəsi istifadə edilə bilər ki, bu da texnologiyayı təkmilləşdirməyə və yeni xassələrə malik strukturlar yaratmağa, mükəmməl Si texnologiyasında dielektriklərin tətbiqi, həmin strukturların funksional xassələrini xeyli yaxşılaşdırmağa imkan verir. Məsələn Si, qrafen və onlar əsasında yaradılmış nanostrukturların tədqiqi və onların xarakteristikalarının öyrənilməsinə zərurət yaranmışdır. Bu növ quruluşa malik materialların daha da inkişaf etdirilməsi optik mikroelektronikanın perspektiv istiqaməti hesab edilir. Bunlardan müxtəlif vericilərin hazırlanmasında istifadə edilməsi məsələsini həll etmək üçün yeni tədqiqatlar aparılmalıdır. Bu yanaşmanın anizotrop materiallar əsasında hazırlanmış geniş funksional imkanlı nanostrukturlara tətbiq edilməsi bu sahədə yeni xassəli və metroloji xüsusiyyətlərə malik cihazlar yaratmağa imkan verə bilər.

Beləliklə, parametrlərinin paylanması qeyri-bircins olan çoxtəbəqəli strukturların tədqiqi və bu tədqiqatların metroloji və metodoloji təminatı aktualdır.

Kvant elektronika inkişaf etdikcə nanoelektron quruluşlu geniş funksional imkanlara malik cihazların - işıq diodları və lazerlərin, fotodiodların yaradılması problemlərinin həlli üçün nanostrukturların, kvant iş prinsipli cihazların, müxtəlif optik elementlərin tədqiqi məsələləri ön plana çıxır [1,2]. Yarımkeçirici üçölçülü nanostrukturlar unikal və bir-birindən fərqli fiziki xassələrə malik olduğundan onların xarakteristikalarının tədqiqi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Bütün texniki

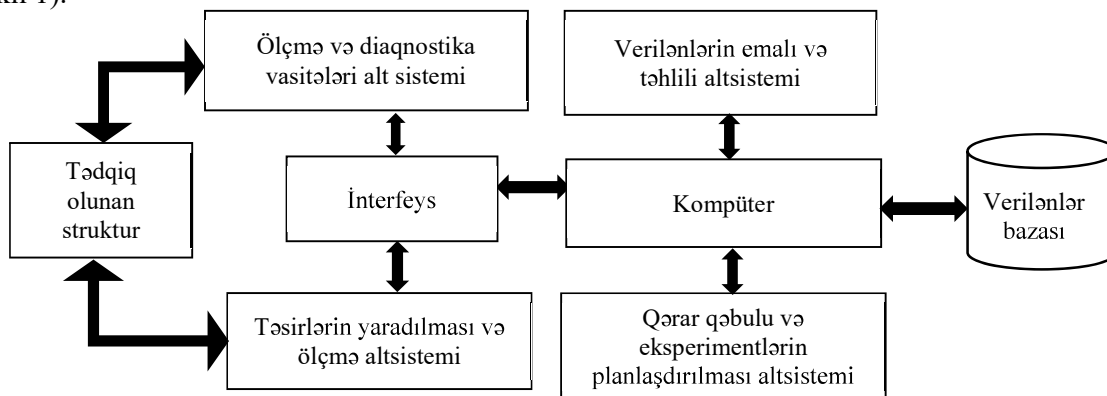
tədqiqat sahələrində olduğu kimi, nanostrukturлар üzərində eksperimental tədqiqat zamanı həm təbəqələrin, həm də bütün qeyri-bircins strukturun hazırlanması texnologiyasına uyğun olaraq, elektrik və fotoelektrik xassələrinin tədqiqindən ibarət elektrik-fiziki, termiki-fiziki, fiziki-kimyəvi və mexaniki xassələri, həm də temperatur asılılıqlarının tədqiq edilməsi əsas məsələlərdən biridir [3]. Bu zaman elektrik, optik tədqiqat və diaqnostika və eləcə də dağıtmayan nəzarət üsulu olan struktur diaqnostika üsulları istifadə olunur. Bu üsullar zond tədqiqat metodlarını əhatə edir [4]. Təbəqələrdə müxtəlif yükdaşıyıcıların konsentrasiyası və ya kristalın tərkibi rentgen mikroanaliz üsulları ilə kifayət qədər operativ və effektiv təyin edilir.

Qeyd edək ki, son illərdə nanoməsaməli və qrafenli, polimer və nanokompozit materialların istehsalında xeyli tərəqqi müşahidə olunur ki, bu da həmin istiqamətdə əlavə tədqiqatların aparılmasını tələb edir. Bu, həm yarımkeçiricilərə, həm də nanostrukturlu cihazlar yaratmaq üçün istifadə olunan dielektrik materiallara da aiddir [5].

Nəzəri hissə.

Yarımkeçirici strukturların tədqiqi üçün müəyyən ölçmə qurğuları və kompleksləri işlənmişdir. Bunlara misal olaraq [6-8]-i göstərmək olar, bu vasitələrin tətbiqi heteroqecidləri və işıq diodlarının tədqiq edilməsini təmin edir. Lakin bu qurğular və sistemlər universal olmayıb, yeni informasiya texnologiyalarının tərkib hissəsi olan süni intellekt alqoritmlərindən istifadə etmir və təyinatına görə nanostrukturların eksperimental tədqiqi üçün nəzərdə tutulmamışdır.

Buna əsaslanaraq, optik elektron nanostrukturların eksperimental tədqiqi, nanostrukturda baş verən proseslərin xüsusiyyətləri və qanunauyğunluqlarının öyrənilməsi və artıq hazır olan strukturun vəziyyətinin diaqnostikası üçün avtomatlaşdırılmış tədqiqat sistemi təklif olunmuşdur (şəkil 1).



Şəkil 1. Sistemin struktur blok-sxemi

Bu sistem ölçmə və diaqnostika altsistemindən, tədqiqat və qərar qəbulu zamanı əldə edilmiş məlumatların emalı və təhlili altsistemindən, təsirlərin yaradılması və ölçmə altsistemindən, eksperimentin planlaşdırılması və qərarın qəbulu altsistemindən, kompüter və verilənlər bazasından ibarətdir. Verilənlərin emalı altsistemində verilənlər informasiyanın emalı alqoritmləri əsasında süzülür və hamarlanır, seçilmiş riyazi model üçün aproksimasiya funksiyası seçilir, model identifikasiya olunur və qərar qəbulu altsistemi üçün məlumatlar hazırlanır.

Eksperimentlərin planlaşdırılması və düzgün aparılması məqsədilə metal, oksid və ərintilərin əsas göstəriciləri və xarakteristikaları, müxtəlif ölçmə cihazları, ölçmə və diaqnostika qurğularının əsas parametrlərinin dəyişmə diapazonları verilənlər bazasına daxil edilir. Xüsusi olaraq işlənmiş verilənlər bazasının idarəetmə sistemi baza ilə iş səmərəliliyini artıracaq ki, bu da verilənlər bazasının vaxtında yenilənməsi və aidiyyəti olmayan məlumatların həcmnin azalmasında özünü büruzə verəcəkdir.

Elektron və zond mikroskopiyası və spektroskopiya cihazları ilə tədqiqatda, hər bir təbəqədə və bütün strukturda səthi qüsurları diaqnostika etmək üçün nümunənin tanınması üsullarından istifadə etmək zəruri olduqda, qərar qəbulu prosesinin intellektuallaşdırılması, xüsusilə effektivdir. Bu halda informasiyanın ən səmərəli emal üsulu rəqəmsal siqnalların emalı üsullarından istifadə

etməkdir. Qərar qəbulunun intellektuallaşdırılması məsələləri həm intellektual ölçmə cihazlarından, həm də yeni informasiya texnologiyalarından, qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsindən, qeyri-səlis məntiqdən, genetik alqoritmlərdən və süni neyron şəbəkələrindən istifadə etməklə həll edilə bilər. Sistemin intellekti, həmçinin siqnalların süzülməsi və hamarlanması, anomal ölçmələrin çeşidlənməsi funksiyasını yerinə yetirən intellektual sensor və çeviricilər vasitəsilə təmin edilir. Bu bazaya daxil edilən məlumatların həcmi azaldır, sistemin dinamik xarakteristikalarını yüksəltməyə imkan verir. Ölçmə və diaqnostika vasitələri olan eksperimental qurğuların intellektual sistemə qoşulması ölçülmüş siqnalların səviyyələrinin məntiqi və rəqəmsal siqnalların səviyyələri ilə uzlaşdırılmasını təmin edən xüsusi interfeys vasitəsilə realizə edilir. Ölçülmüş parametrlərgərginlik, cərəyan, tutum, işıq şüasının tezliyi və gücü, maqnit sahəsinin gərginliyi. Nəzarət olunan parametrlər: altlığın və bütün nanostrukturun cərəyanı və gərginliyi, işıq şüasının gücü, maqnit sahəsinin gərginliyi. Eyni zamanda, bəzi parametrlər, yəni gərginlik, cərəyan və tezlik virtual ölçmə vasitələri ilə ölçülə bilər ki, bu da həmin parametrləri monitorda nəzarət edərək idarə etməyə imkan verir.

Məlumatların emalı onların ilkin süzülməsi və hamarlanması, hər hansı parametr və ya xassəsinin dəyişməsindən asılı olaraq, tədqiq olunan prosesin və ya tədqiq olunan təbəqənin və ya bütün strukturun riyazi modelinin aproksimasiya funksiyasının seçilməsi və daha sonra identifikasiya edilməsindən ibarətdir. Determinik riyazi modellə yanaşı, ehtimal-statistik xarakteristikalarından və süni intellektdən - SoftComputing üsullarını tətbiq etmək məqsəduyğundur. Bu məqsədlə müvafiq proqram paketi işlənilib hazırlanır və tətbiq olunur. Bu zaman tədqiqatın və öz növbəsində eksperimentlərin planlaşdırılmasının səmərəliliyini artırmaq və arzu olunan nəticələri əldə etmək üçün imitasiya modelləşdirməsinin imkanlarını nəzərdən keçirmək lazımdır.

Bir təbəqənin və ya strukturun tədqiqi ölçmə avadanlığı üçün təlimatda təsvir edilmiş təlimatlara uyğun olaraq, əldə edilmiş və arzu olunan nəticələri nəzərə almaqla, eksperimentlər planını tənzimləməklə aparılır. Eksperimentlərin gedişi, müxtəlif ölçmə cihazlarının və qurğularının parametrləri və sazlamaları haqqında məlumatların əks etdirilməsi real vaxt rejimində icra edilir ki, bu da tədqiq olunan prosesləri monitorda müşahidə etməyə, əsas ölçülən və idarə olunan parametrləri göstərməklə zəruri aralıq hesabatlar və planlaşdırılmış tədqiqatların sonunda tədqiqatçının tələbi ilə yekun hesabat tərtib etməyə imkan verir. Bu tədqiqatların sonunda tədqiqatın səviyyəsini və əldə olunan hədəfləri dəqiqləşdirmək üçün bütün tədqiqat prosesi və əldə edilmiş yekun nəticələr təhlil edilir. Alınmış məlumatlar kifayət deyilsə, verilənlər şübhə doğurduqda təkrar tədqiqatlar planlaşdırılır.

Eksperimental tədqiqatlar zamanı əldə edilən məlumatlar və təhlilin nəticələri həm də təbəqələrin sayını, qalınlığını və materialını, eləcə də təsiredici parametrlərini dəyişməklə nanostruktur üçün yeni eksperimentlər planlaşdırmağa imkan verir.

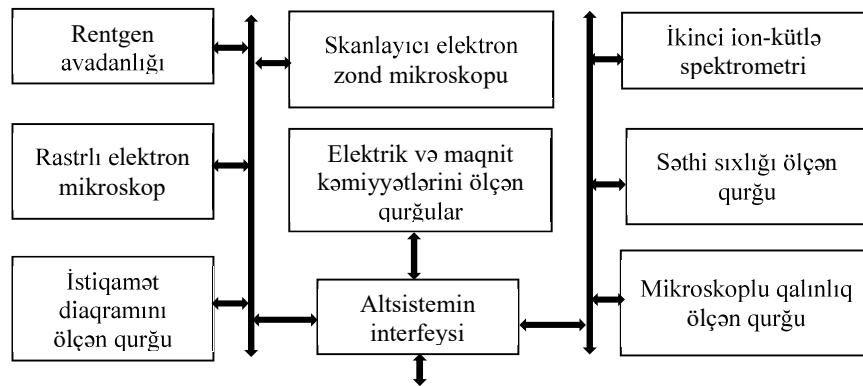
Bu sistemin məqsədi və funksiyaları aşağıdakılardır:

- ölçmələrin dəqiqliyi və etibarlılığının;
- ölçmə nəticələrinin emalının və verilənlərin təhlili operativliyinin;
- diaqnostik prosedurların etibarlılığının;
- eksperimental tədqiqatların effektivliyinin yüksəldilməsi və sistemin funksional imkanlarının artırılmasıdır.

Texniki ölçmə və diaqnostika vasitələrinin müvafiq altsistemdə konfigurasiyası müxtəlif növlü sınaqlardan ibarət eksperimentlər vasitəsilə aparılan tədqiqatlar nəticəsində həll olunan məsələlərin müxtəlifliyi və tədqiqat sisteminin funksiyaları toplusuna əsasən müəyyən olunur. Nanostrukturların hərtərəfli tədqiqi məqsədlə həmin altsistemə daxil edilməli olan vasitələr aşağıda göstərilmişdir (şəkil 2):

- rentgen şüalı zond spektroskopu;
- yüksək ayırdetməli mikroskoplu qalınlıq ölçən;
- elektron mikroskop;
- skanedic elektron zond mikroskopu (skanedic tunel və atom-qüvvə mikroskopları);
- ikinci ionlu kütlə spektrometri;
- şüalanma diaqramını və istiqamətini ölçən qurğu;

- səthin sıxlığını ölçən qurğu;
- elektrik və maqnit parametrlərini ölçən qurğular.



Şəkil 2. Ölçmə və diaqnostika altsistemi

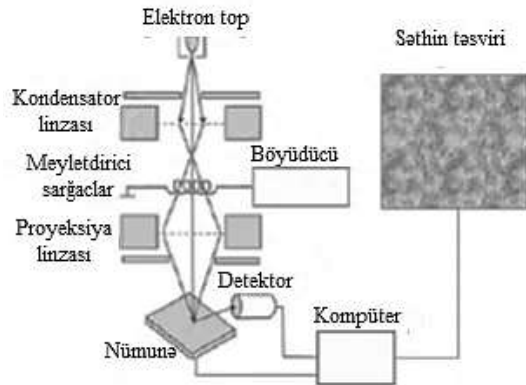
İşıq diodu və ya lazer şüasının spektrinin, həmçinin fotodiodların tədqiqində işıq mənbəyinin spektral və Veyvlet analizi ayrıca məsələdir. Veyvlet analiz spektral tədqiqatları əyani etməyə, şüa spektrində tezlik dəyişmələrinin real diapazonlarını təyin etməyə imkan verir. Qeyd edək ki, müxtəlif tezlikli və formalı cərəyanın nanostruktura təsirinin tədqiqi zamanı da belə bir analiz yerinə yetirilir. Beləliklə, nanostrukturlar üzərində aparılan müxtəlif tədqiqat növləri arasında spektral analiz xüsusi yer tutur. Digər bir tədqiqat növü nanostruktur təşkil edən maqnit strukturunun tədqiqidir. Bu tip tədqiqatlar eksperimentin dəqiq planlaşdırılmasını və maqnit sahəsinin gərginliyinin yüksək dəqiqlikli ölçmə vericisinin olmasını tələb edir. Kvant ölçülü nanostrukturları təhlil etmək üçün fotoelektrik spektroskopiyaya üsulundan, maddənin strukturunu öyrənmək üçün isə difraksiya analizi üsullarından istifadə olunur. Hal-hazırda rentgenlə struktur analiz, elektron və ya neytron difraksiyası ilə analiz üsulları geniş tətbiq olunur. Maddələrin spektral tərkibi monoxromatorla təyin edilir [9]. Nanostrukturun elektrik-fiziki parametrlərini təyin etmək üçün volt-ampere və volt-farad xarakteristikaları ölçülür və işıqlanma dəyişməklə strukturun çevirmə həssaslığı təyin olunur [10]. Çoxtəbəqəli strukturun cərəyanı görə işığa həssaslığı şüanın gücünün məlum qiymətində müəyyən edilir.

Skanedici elektron mikroskopda səthin tədqiq edilməsi üçün fokuslanmış elektron şüası istifadə edilir (şəkil 3) [11]. Müvafiq təsviri almaq üçün detektə edilmiş siqnallar: ikinci və geri qayıdarkən səpələnmiş elektronlar; rentgen şüaları, nümunədən keçən cərəyanın qiymətləri əsasında yerinə yetirilir.

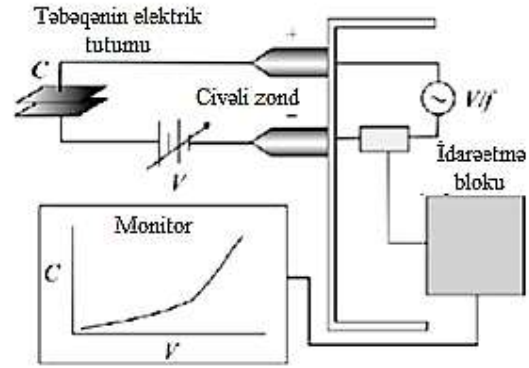
Səthin təsviri kompüterdə qeyd olunan siqnal əsasında yaradılmış ikiölçülü şəkildir. Skanedici elektron mikroskopda, başlanğıc enerjisi ~1-10 keV olan elektron şüa linza sistemi vasitəsilə tədqiq edilən təbəqənin (strukturun) səthində diametri 1-10 nm olan bir nöqtədə fokuslanır. Bu şüa dəsti, displey qismində istifadə edilən video boruda elektron şüa ilə sinxron şəkildə sarğaclıq sistemi vasitəsilə meyl etdirilərək səthi skanlayır. Hər iki şüa eyni skanedici generator vasitəsilə idarə olunur. Bu səbəbdən təsvirin böyüməsi ekran ölçüsünün təbəqə səthində skanlanan sahənin qiymətinə nisbətində bərabər alınır. Skanedici elektron mikroskop əsasən səthin topoqrafiyasını vizual (gözlə aydın görünən) şəkildə tədqiqatçıya çatdırmaq (ikinci elektronları qeyd etməklə) və səthdə elementlərin paylanma xəritəsini əldə etmək üçün tətbiq edilir (qayıdan səpələnmiş elektronlar və rentgen şüaları ilə qeyd edilərkən). Xarici təsirləri aradan qaldırmaq üçün tədqiqat nümunələri aşağı təzyiq altında (vakuum sistemi vasitəsilə təmin edilir) tədqiq olunur.

Skanedici elektron mikroskopunun üç əsas rejimi vardır: ikinci elektronlar, əks olunan elektronlar, rentgen şüaları (mikroanalizator). Eksperimental tədqiqatlar zamanı mikroskopun zondunda cərəyan geniş diapazonda dəyişə bilər.

Tədqiq edilən strukturda yükdaşıyıcıların konsentrasiyası volt-farad xarakteristikası (C-V üsulu) əsasında, həmin strukturun tutumu ilə rəzə gərginliyi arasındakı asılılığın təhlili ilə təyin olunur. C-V üsulunu realizə etmək üçün qurğunun sxemi şəkil 4-də təqdim edilmişdir.



Şəkil 3. Skanedic elektron mikroskopun blok-sxemi



Şəkil 4. C-V üsulunu realizə edən qurğu və sxem

Nanostrukturların volt-farad xarakteristikalarının eksperimental olaraq tədqiqində, ölçmədə istifadə olunan siqnalın tezliyindən asılı olaraq iki növ volt-farad (C-V) ölçmə üsulu tətbiq olunur: 1) yüksək tezlikli; 2) kvazi-statik üsul. Strukturun tutumunu müəyyən edən təbəqədə sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, siqnalın perioduna uyğun müddət ərzində dəyişir.

Aşağı tezliklərdə, metal-oksid-yarımkeçirici strukturun ümumi tutumu struktura daxil olan bütün keçid cütlərinin tutumları cəminə bərabər qəbul edilir. Aşağı tezliklərdə C-V xarakteristikaları kvazi statik üsulla təcrübi çıxarılır. Kvazi-statik üsulla tədqiqat zamanı strukturda rəzə gərginliyi xətti dəyişərkən sürüşmə cərəyanının ölçül-müş qiyməti tədqiq edilən strukturun tutumuna mütənəsib olur.

Yüksək tezlikli üsulda inversiya kanalında olan yük gərginliyin dəyişməsinə izləyə bilmir, buna görə də, qeyri-əsas yükdaşıyıcıların tutumu-nu bu zaman sıfıra bərabər qəbul edirlər. Beləliklə, bu cür çoxtəbəqəli strukturun tutumu yüksək tezlikdə həcmi yüklər oblastının tutumu ilə təyin olunur. Bu zaman dielektrikin və qeyri-əsas yükdaşıyıcıların tutumları nəzərə alınmır. Bu üsulda ölçmə gərginliyi aşağı amplitudlu və rəzə gərginliyi sabit qiymətə malikdir.

C-V xarakteristikalarının parametrlərindən istifadə etməklə əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyası n_k aşağıdakı düsturla hesablanır.

$$n_k = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0} \frac{U_{k+1} - U_k}{\frac{1}{(C_{k+1} - C_p)^2} - \frac{1}{(C_k - C_p)^2}} \quad (1)$$

burada: e - elektronun yükü; ϵ - yarımkeçiricinin dielektrik sabiti; ϵ_0 - havanın dielektrik sabiti; C_k - tutumun ölçülmüş qiyməti; C_p - parazit tutumdur.

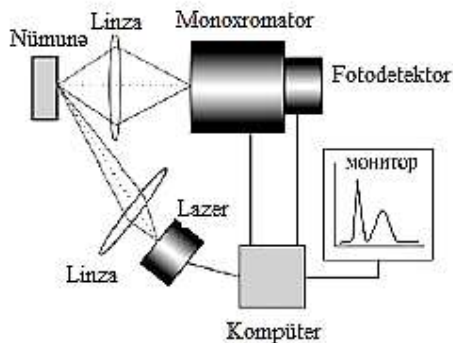
Yükdaşıyıcıların konsentrasiyası təyin edildikdən sonra onların tədqiq edilən təbəqənin qalınlığı üzrə paylanmasını nümayiş etdirən profili qurulmalıdır.

Yarımkeçirici nanostrukturların optik xassələri fotoluminensensiya üsulu ilə tədqiq olunur. Yarımkeçiricilərin zona strukturunu təsvir etməyə imkan verən parametrlər optiki, elektrik-fiziki xarakteristikalar əsasında təyin olunur. Bu parametrlərin xarici təsirlər altında dəyişməsi qanunauyğunluğu metroloji cəhətdən fotoluminensensiya üsulu ilə ölçülür. Müvafiq qurğunun blok-sxemi şəkil 5-də təqdim edilmişdir.

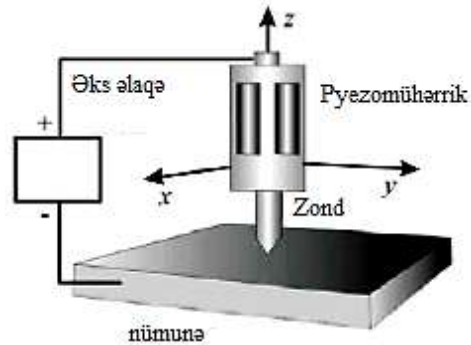
Strukturun nümunəsi optik qurğuya yerləşdirildikdən sonra optik şüa mənbəyi rolunu oynayan lazer qoşulur. Şüa toplayıcı linza vasitəsilə frontal təbəqəyə yönəldilir. Nümunəyə perpendikulyar şüa süzgəcdən keçərək linza vasitəsi ilə monoxromatorun girişinə, onun çıxışından sonra isə fotodetektora verilir. Fotodetektor və monoxromatorun çıxış siqnalları kompüterə ötürülür. Maksimum gücü $15,5 \text{ mV/t}$ olan şüanın gücü dalğa uzunluğuna müvafiq dəyişdirilir, bu zaman, həmçinin temperaturun qiyməti də ölçülür.

Təbəqənin səthi nazik metal zondla skan edilir. İki koordinatlı pyezoelektrik qurğu zondla tədqiq edilən təbəqənin səthi boyunca hərəkət etdirir. Bu halda, yaranan rastrın sətirləri bir-birindən $0,1 \text{ nm}$ qədər məsafədə yerləşir.

Zondun trayektoriyası səthin relyefini təkrarlayır. Bu, tunel cərəyanının qiymətində dəyişməni hiss edib, manipulyatorla gərginliyi dəyişdirən əks-əlaqə sistemi vasitəsilə yerinə yetirilir. Zond manipulyator vasitəsilə şaquli olaraq elə hərəkət etdirilir ki, zondla nümunə arasındakı məsafə sabit qalsın, tunel cərəyanının qiyməti dəyişməsin.

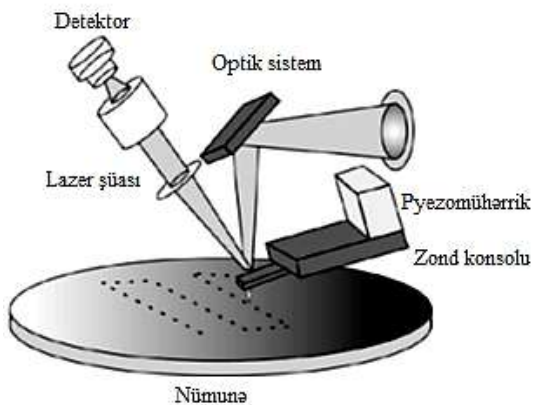


Şəkil 5. Fotoluminensensiya üsulunu realizə edən qurğunun blok-sxemi



Şəkil 6. Skanedici mikroskopun quruluş sxemi

Səthin üçölçülü təsviri gərginliyin dəyişməsinə görə qurulur. Mikroskopun ayırdetməsi təqribən $0,2 \text{ nm}$ -dir. Atom-qüvvə mikroskopiyası üsulu səthin morfoloji vəziyyətini tədqiq etmək üçün istifadə olunan zondlu mikroskopiya üsullarından biridir. İş prinsipi zond ilə tədqiq edilən nümunə arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsinin analizinə əsaslanır. Bu cihazlar skanedici tunel mikroskopundan fərqli olaraq, həm keçirici, həm də dielektrik səthləri tədqiq edərək, nahamarlıqları təyin etməyə imkan verir. Atom-qüvvə mikroskopunun quruluşu və sxematik tətbiq prinsipi şəkil 7-də göstərilmişdir.



Şəkil 7. Atom-qüvvə mikroskopunun quruluşu və tətbiq sxemi

Atom-qüvvə mikroskopunda fəza ayırdetməsi konsolun ölçüsü ilə konsoldakı iynənin ucunun ayrılığı ilə müəyyən edilir. Üfüqi istiqamətdə ayırdetmə atomun ölçüsü səviyyəsində olub, şaquli istiqamət üçün ayırdetmədən xeyli artıqdır. Qarşılıqlı təsiri cəzb olunma və ya itələnmə kimi qəbul olunur. Bu, zond ilə səthin Van der Waals qüvvələrinin təsiri altında yaxın məsafədə qarşılıqlı təsirdir. Qarşılıqlı təsirin digər növləri olan elektro-statik, sürtünmə və maqnit qüvvələrini təhlili qeyd edilən üsulun modifikasiyaları əsasında aparılır. Zondla nümunə arasındakı məsafə böyüdükcə cazibə azalır. Məsafə azaldıqda cazibə səthi atomların elektron buludları itələnməyə (elektrostatik itələnməyə) məruz olana qədər artır. Kimyəvi rabitə uzunluğu ($0,1 \text{ nm}$) məsafəsində ümumi cazibə qüvvəsi sıfır bərabər olur;

kiçik məsafələrdə isə itələmə qüvvəsi cazibə qüvvəsindən üstün olur. Mikroskop vasitəsilə təsvirləri almaq üçün iş rejimləri iynədən nümunəyə (təbəqə və ya struktura) qədər olan məsafədən asılı olaraq seçilir. Mikroskopda aşağıdakı rejimləri qurmaq mümkündür: təmaslı; təmassız; yarım-təmaslı. Təmaslı rejimdə, zondla nümunə arasındakı məsafə $0,1 \text{ nm}$ tərtibində götürülür. Bu zaman zondla nümunə yumşaq fiziki təmasda olur, itələyici qüvvələrin təsirinə məruz qalan zondun ucundakı iynə ilə nümunə arasında qarşılıqlı təsir zond yerləşdirilmiş konsolu səthin topoqrafiyasına uyğun əyərək topoqrafiyanı təkrarlamağa məcbur edir. Adətən topoqrafik təsvirlərin əldə edilməsi üçün sabit qüvvə rejimi və ya sabit hündürlük tətbiq edilir. Təmassız (cazibə rejimi) rejimdə konsol pyezoelektrik kristalın köməyi ilə nümunənin səth üzərində $\sim 2 \text{ nm}$ amplitud ilə rəqs edir. Bu məsafə zond ilə səth arasındakı məsafədən artıqdır. Skanlama zamanı cazibə qüvvəsi,

rəqslərin rezonans tezliyinin və ya amplitudun dəyişməsinə görə təyin olunur və səthin təsviri isə bunlara uyğun olaraq yaradılır.

Təbəqələrin ayrılığı geniş sahəli panoram interferensiya, səthin nahamarlığı - profiloqrafiya və ellipsometriya üsulu ilə müəyyən olunur. MICROSCAN lazerli ellipsometri yüksək ayırdetməyə malik olub, nümunənin polyarizasiya-optik xassələrini tədqiq etmək üçün tətbiq edilir. Statik fotometr sxemindən istifadə edilən bu qurğuda avtomatik hərəkət edən ikikoordinatlı masa istifadə olunur. Ölçmə dəqiqliyini yüksəltmək məqsədilə sınaq nümunəsi ilə üzbəüz mikroobyektiv quraşdırılır ki, bu da lazer işığını nümunə üzərinə fokuslayır. Bu, ölçməni dar oblastda apararaq, dəqiq nəticələr əldə etməyə imkan verir. Ölçülən yerin ölçüsü 5-10 mkm, masanın hərəkət dəqiqliyi 10 mkm-dir. Tədqiq edilən yerin skanlanmasına sərf olunan müddət həmin yerin ölçüsü və sazlanmış skanlama məsafəsindən asılıdır. Skanlama nəticələri üçölçülü təsvir və ya topoqram şəklində göstərilə bilər.

Nanoölçülü miqyasda səth nahamarlığının qiymətləndirilməsi zond mikroskopiyası ilə yerinə yetirilir. Lövhələrin oriyentasiyası rentgen difraksiya analizi və kimyəvi tərkibi - ikinci ion kütlə spektroskopiyası, elektron mikroskopiya, kimyəvi analiz fotoelektron spektroskopla müəyyən edilir. Faza və kimyəvi tərkibi təhlil etmək üçün spektrin tədqiqi ilə birlikdə işığın səpələnməsi üsulundan istifadə olunur.

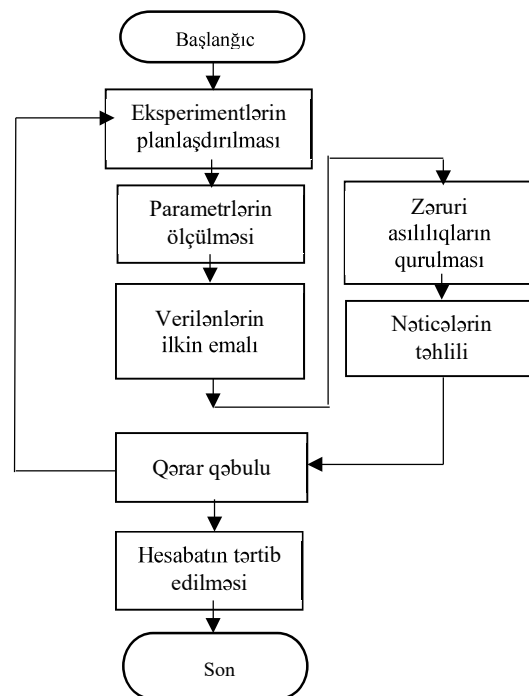
Altsistemin interfeysi proqramlaşdırılan məntiqi kontroller əsasında qurulur ki, bu da çevikliyi və cəldliyi artırmağa, müxtəlif avadanlıqlarla interfeysin işini tez bir zamanda sazlamağa imkan verir. İnterfeyslər üçün unifikasiya edilmiş məlumat mübadiləsi protokollarını seçmək məqsədəuyğundur.

Müvafiq təsirlər yaratmaq və ölçmələr icra etmək üçün altsistem eksperimental plana uyğun olaraq hər bir tədqiqat metodunda əsas parametrlərin dəyişdirilməsi üçün siqnallar yaradır, tədqiq olunan struktura təsir göstərilir və kəmiyyətlərin ölçülməsi üçün takt siqnalları verir.

Eksperimental tədqiqatların planlaşdırılması və aparılması, ölçmə nəticələrinin təhlili alqo-ritmi süni intellektə əsaslanıb, eksperimental tədqiqatlar zamanı bəzi məsələlərin həllini avto-matlaşdırmağa imkan verəcək. Yuxarıda qeyd edilənlərə uyğun olaraq, sistemin sadələşdirilmiş iş alqoritmi aşağıdakı şəkil 8-də təqdim olunmuşdur.

Alqoritmin işi, yəni ölçmə nəticələrinin emalı aşağıdakı mərhələlərdən ibarətdir. Eksperimentlərin planı tədqiqatların məqsədi və vəzifələrinə müvafiq tərtib edilir. Hazırlanmış plana uyğun olaraq aparılan eksperimentlərin gedişində seçilmiş parametrlər ölçülür. Ölçmə nəticələri ilkin süzülmə, hamarlanma və orta qiymətin təyin edilməsi alqoritmləri əsasında ilkin emala məruz qalır. Alınmış məlumatlar tələb olunan asılılıqları, xarakteristika və ayrılıqları qurmaq üçün istifadə olunur. Əgər tədqiq olunan prosesi determinik riyazi modellər adekvat təsvir edərsə,

qurulmuş asılılıqları aproksimasiya etmək üçün həmin modellər istifadə olunur, əks halda identifikasiya üçün daha mürəkkəb proqram təminatının işlənməsi ilə əlaqədar ilkin mürəkkəbliyi ilə fərqlənən, genetik alqoritmlərdən və ya süni neyron şəbəkələrə əsaslanan alqoritmlərdən istifadə etmək lazımdır ki, bu da kifayət qədər adekvat modellər əldə etməyə imkan verir. Eksperimental tədqiqat nəticələri təhlil edildikdən sonra idarəetmə tədqiqatların başa çatdırılması və ya davam etdirilməsi barədə qərar qəbul edilən bloka ötürülür. Alınmış məlumatlar eksperimental tədqiqatın



Şəkil 8. Ölçmə nəticələrinin işlənməsi alqoritmin blok-sxemi

məqsəd və vəzifələrinə cavab verirsə, tədqiqat üzrə hesabat tərtib edilir, əks təqdirdə yeni eksperimentlər planlaşdırılır və ya əvvəlki plana düzəliş edilir.

Qərar qəbul etmə blokunun iş alqoritmi qeyri-səlis çıxarışa əsaslanan ekspert sistemi əsasında qurulur. Bu zaman qeyri-səlis qaydalar işlənir, eksperimentlərin gedişində tədqiqat nəticələrinin təhlilində tətbiq edilir. Bu blokda maşın öyrənməsi süni neyron şəbəkələrindən istifadə edilməklə təmin edilə bilər. Bu alqoritmi müəyyən dəyişikliklə tədqiq olunan prosesin riyazi modelini identifikasiya etmək üçün də tətbiq etmək mümkündür.

Beləliklə, nanostrukturların eksperimental tədqiqi sistemi aşağıdakı məsələlərin həllini və funksiyaları təmin edir:

- eksperimentlərin planlaşdırılması və aparılması;
- tədqiqat planına uyğun olaraq idarəedici təsirlərin hasil edilməsi;
- seçilmiş parametrlərin ölçülməsi;
- alınmış məlumatların ilkin emalı;
- qurulmuş asılılıqlara uyğun aproksimasiya funksiyalarının seçilməsi;
- riyazi modellərin aproksimasiya funksiyaları əsasında identifikasiyası və adekvatlığın yoxlanması;
- eksperimentlərin nəticələrinə görə onun məqsəd və vəzifələrinin yerinə yetirilməsi baxımından qərarın qəbul edilməsi;
- tədqiqatlar üzrə hesabatların hazırlanması.

Eksperimentlərin planlaşdırılması sınaqlar sayını optimallaşdırmaq və nəticələrin etibarlılığını yüksəltmək üçün yerinə yetirilir. Eksperimentləri planlaşdırarkən tam və kəsr faktorlu prinsiplər tətbiq oluna bilər. Bunlardan birincisində eksperiment zamanı prosesə təsir edən bütün amillər dəyişdirilir ki, bu da amillərin sayının artması ilə sınaqlar sayının sürətlə artmasına, informasiyanın izafiliyinə gətirib çıxara bilər. Tam faktorlu eksperimentin bir hissəsi olan kəsr faktorlu eksperimentdə yalnız nəzərəcarpacaq təsiri olan amillər, yəni dəyişməsi məqsəd kəmiy-yətlərinin əhəmiyyətli dəyişməsinə səbəb olan amillər istifadə olunur. Eksperimental tədqiqatların ciddi planlaşdırılması üçün amillərin seçilməsinə tədqiq olunacaq prosesin ilkin nəzəri təhlili və ya tədqiq olunan strukturla bir neçə sınaq eksperimentləri əsasında alınan nəticələr təsir göstərir.

Təcrübələrin aparılması şərtlərinin dəyişdirilməsi və strukturun xassələrinə təsir göstərilməsi üçün idarəedici təsirlərinin hasil edilməsi eksperimental tədqiqat planı əsasında realizə olunur, bu zaman parametrlərin dəyişmə həddləri (diapazonu) mütləq göstərilməlidir.

Tədqiqat hesabatları müvafiq şöbələr və tədqiqat sifarişçiləri tərəfindən diqqətlə təhlil edilir, bundan sonra məsul şəxslərin icazəsi ilə bütün hesabat və ya onun ayrı-ayrı hissələri, daha sonra nümunə və məlumat kimi gələcək tədqiqatlarda qərar qəbul etmək üçün çıxarış qaydaları işlənməsi məqsədilə verilənlər bazasına daxil edilə bilər.

Yarımkeçirici materiallar və yarımkeçiricilər əsasında qurulmuş çoxtəbəqəli strukturlarda dərin çökəklərin tədqiqi eksperimental tədqiqatların əsas istiqamətidir. Bu növ tədqiqatlar daima fasiləsiz şəkildə, ildən ilə aparılır. Bu, bərk cisim elektronika üçün yeni element bazasının, materialların, bunlar əsasında isə çoxtəbəqəli struktura malik cihazların yaradılması ehtiyaclarından irəli gəlir.

Çoxtəbəqəli strukturlarda nahamarlıq və qüsurların yaranma səbəblərinin tədqiqi, təsviri və modelləşdirilməsində qarşıya çıxan əsas problem və həll olunması tələb olunan məsələlərdən biri tədqiqat zamanı strukturların elektrik və fiziki parametrlərinin dəyişməsinin həmin qüsurların yarımkeçirici və dielektrikdə, eləcə də onların keçid sərhədində müxtəlif səbəblərdən yaranması ilə izahının təsdiq və ya təkzib olunmasının sübut edilməsidir. Qeyd edilən problemlərin həlli üçün yarımkeçirici təbəqə, dielektrik və onların sərhədində gedən proseslərin bir-birindən fərqləndirilməsi və hər birinin ayrıca tədqiq edilməsini təmin edən müfəssəl eksperimental və nəzəri tədqiqatlar aparılmalıdır. Çoxtəbəqəli nanostrukturda nahamarlığın tədqiqi kompleks yanaşma əsasında həmin strukturların müvafiq altlığında, dielektrik təbəqəsində, eləcə də keçid sərhədində proseslərin yuxarıda qeyd edilən elektrofizika üsulları tətbiq edilməklə öyrənilməsindən ibarətdir.

Nəticə. Kristalların hazırlanması (yetişdirilməsi) zamanı böyümə prosesinin tədqiqi tələb olunan xüsusiyyətlərə malik nanostrukturların yaradılmasında mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Bu

problem kristal səthinin monitorinqi məlumatları əsasında həll edilir. Heterostrukturda əlavə təbəqələr, məsələn, Si-oksidi əsasında dielektrik təbəqə və üzərində nanostrukturun digər təbəqələrinin bilavasitə yetişdirildiyi altlıq da vardır ki, bunlar da öz növbəsində əlavə tədqiqatların aparılmasını tələb edir.

Sistemdə interfeys funksiyaları kifayət qədər mürəkkəbdir, buna görə də ölçmə və diaqnostika vasitələrində, eləcə də idarəedici təsirlər hasil edən vasitələrdə quraşdırılmış müxtəlif növ aparatların və uyğun cihazların seçilməsinə və işlənməsinə diqqətlə yanaşmaq tələb olunur. Bu vasitələrin digər altsistemlər və sistemin əsas proqram təminatı ilə proqram uyğunluğu ayrıca bir məsələdir. Bu məqsədlə həmin problemin həllini təmin edən əlavə proqram bloklarının işlənməsi nəzərdə tutulur.

Sistemin realizə edilməsi nanostrukturların öyrənilməsi üzrə tədqiqatların məhsuldarlığını və səmərəliliyini yüksəltməyə imkan verəcəkdir.

ƏDƏBİYYAT

1. Абрамов Д.В., Хорьков К.С., Кутровская С.В. и др. Исследование полупроводниковых слоистых систем фотоники. Известия РАН. Серия физическая, 2012, № 6, с. 698-701.
2. Белоконев В.М. Современные технологии фоточувствительных материалов для изделий оптоэлектроники // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 12-2. – с. 256-265.
3. Кирчанов В.С. Физические основы нанотехнологий фотоники и оптоинформатики: уч. пособие / В.С. Кирчанов – Пермь. Изд-во Перм. нац. иссл. политех. ун-та. 2019. - 221с.
4. Смирнов В.И. Неразрушающие методы контроля параметров полупроводниковых материалов и структур / В. И. Смирнов. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. -75 с.
5. Современные проблемы нанотехнологий: учеб. пособие. Часть 2/ (курс лекций) / Б.М. Синельников, С.Э. Хорошилова, В.А. Тарала и др. Ставрополь: СевКав ГТУ, 2012.-200 с.
6. Костюков С.А. Измерительный комплекс спектроскопии низкочастотных шумов полупроводниковых диодных структур / С.А. Костюков, А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов и др. // Измерительная техника. – 2013. – № 9. – с. 61–64.
7. Сергеев В.А. Автоматизированная установка для измерения вольт-фарадных характеристик гетеропереходных светодиодов с повышенным разрешением / В.А. Сергеев, И.В. Фролов, А.А. Широков // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 1. – с. 137-138.
8. Смирнов В.И. Аппаратно-программный комплекс для измерения теплового импеданса светодиодов / В.И. Смирнов, В.А. Сергеев, А.А. Гавриков, Д.И. Корунов // Приборы и техника экспериментов. – 2013. – № 1. – с. 135–136.
9. Методы исследования полупроводниковых гетероструктур: учеб. пособие / М.А.А. Номан, К.С. Хорьков, П.Ю. Шамин; – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. -80 с.
10. Федоров, А.В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур / А.В. Федоров. – СПб: СПб.ГУ ИТМО, 2009. – 195 с.
11. Zeynalova Ş.H. Çoxtəbəqəli yarımkeçirici strukturlar: tədqiqi və tətbiqi imkanları / Monoqrafiya. - Bakı, AMEA-nın "Elm" nəşriyyatı, 2021. - 214 s.

REFERENCES

1. Abramov D.V., Khor'kov K.S., Kutrovskaya S.V. i dr. Issledovaniye poluprovodnikovyykh sloistyykh sistem fotoniki. Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya, 2012, tom 76, № 6, s. 698-701.
2. Belokonev V.M. Sovremennyye tekhnologii fotochuvstvitel'nykh materialov dlya izdeliy optoelektroniki // Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii. – 2019. – № 12-2. – s. 256-265.
3. Kirchanov V.S. Fizicheskiye osnovi nanotekhnologiy fotoniki i optoinformatiki: uchebnoye posobiye / V.S. Kirchanov – Perm'. Izd-vo Perm. nats. issl. politekh. un-ta. 2019. - 221s.
4. Smirnov V.I. Nerazrushayushchiye metody kontrolya parametrov poluprovodnikovyykh materialov i struktur / V. I. Smirnov. – Ul'yanovsk: UIGTU, 2012. -75 s.
5. Sovremennyye problemy nanotekhnologiy: ucheb. posobiye. Chast' 2/ (kurs lektsiy) / B.M. Sinel'nikov, S.E. Khoroshilova, V.A. Tarala i dr. -Stavropol': SevKavGTU, 2012. - 200 s.

6. Kostyukov S.A. Izmeritel'nyy kompleks spektroskopii nizkочастотnykh shumov polupro-vodnikovyykh diodnykh struktur / S.A. Kostyukov, A.V. Yermachikhin, V.G. Litvinov i dr. // Izmeritel'naya tekhnika. – 2013. – № 9. – s. 61–64.
7. Sergeyev V.A. Avtomatizirovannaya ustanovka dlya izmereniya vol't-faradnykh kharakteristik geteroperekhodnykh svetodiodov s povyshennym razresheniyyem / V.A. Sergeyev, I.V. Frolov, A.A. Shirokov // Pribory i tekhnika eksperimenta. – 2014. – № 1. – s. 137-138.
8. Smirnov V.I. Apparatno-programmnyy kompleks dlya izmereniya teplovogo impedansa svetodiodov / V.I. Smirnov, V.A. Sergeyev, A.A. Gavrikov, D.I. Korunov // Pribory i tekhnika eksperimentov. – 2013. – № 1. – s. 135–136.
9. Metody issledovaniya poluprovodnikovyykh geterostruktur: ucheb. posobiye M.A.A. Noman, K.S. Khor'kov, P.YU. Shamin; – Vladimir: Izd-vo VIGU, 2014. - 80 s.
10. Fedorov A.V. Fizika i tekhnologiya geterostruktur, optika kvantovykh nanostruktur / A.V. Fedorov. – SPb: SPbGU ITMO, 2009. – 195 s.
11. Zeynalova SH.KH. Çoxtəbəqəli yarımkeçirici strukturlar: tədqiqi və tətbiqi imkanları / Monoqrafiya. – Baku, AMEA-nin « Elm » nəşriyyatı, 2021. – 214 s.

СИСТЕМА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАНОСТРУКТУР

Зейналова Ш.Г.

Национальная Академия Авиации

На основе анализа методов и средств, обеспечивающих повышение эффективности экспериментальных исследований многослойных структур, предложена структура и соответствующий алгоритм работы системы, позволяющей реализовать частичную автоматизацию экспериментальных исследований устройств и структур с помощью соответствующих измерений, методов, инструментов и приспособлений. Обоснованы основные функции и задачи, которые должна решать система, состоящая из средств измерения и формирования воздействий, обработки и анализа данных, подсистемы планирования эксперимента и принятия решений, компьютера, базы данных и интерфейса.

Ключевые слова: наноструктура, экспериментальные исследования, полупроводник, многослойность, фотоприемник, фототранзистор, система автоматизации.

SYSTEM FOR EXPERIMENTAL STUDIES OF NANOSTRUCTURES

Zeynalova Sh.H.

National Aviation Academy

Based on the analysis of methods and means that provide an increase in the efficiency of experimental studies of multilayer structures, a system structure and an appropriate operation algorithm of this system are proposed, which makes it possible to implement partial automation of experimental studies of such type of devices and structures using appropriate measurements, methods, tools and devices. The main functions and tasks be solved by the system consisting of means for measuring and forming influences to nanostructure, processing and analyzing data, a subsystem for planning an experiment and making decisions, a computer, a database and an interface are substantiated.

Key words: nanostructure, experimental studies, semiconductor, multilayer, photo-detector, photo-transistor, automation system.

Rəyçi: t.e.d., prof. R.N. Nəbiyev

Müəllif haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Zeynalova Şəhla Hamlet qızı	Milli Aviasiya Akademiyası	“Aerokosmik cihazlar” kafedrasının dosenti, t.f.d.	shehla_372@mail.ru (+994) 051 355 55 06