

**AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI  
RADİYASİYA PROBLEMLƏRİ İNSTİTUTU**

*Əlyazması hüququnda*

**DAVOUD SODEYF OĞLU MOSTAFA TOBNAGHI**

**ULTRASƏS DALĞALARININ Si ƏSASLI GÜNƏŞ  
FOTOÇEVİRİCİLƏRİNDƏ RADİASİYA DEFEKTLƏRİNİN  
DƏMLƏMƏ PROSESİNƏ TƏSİRİ**

**2225.01.-Radiyasiya materialşünaslığı**

**Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş  
dissertasiyanın**

**A V T O R E F E R A T I**

**BAKI - 2014**

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Radiasiya Problemləri İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

**Elmi rəhbər:**

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,  
professor **R.S.Mədətov**

**Rəsmi opponentlər:**

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,  
professor N.M.Mehdiyev

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,  
dos. N.M.Nəsullayev

**Aparıcı təşkilat:** AMEA-nın Fizika İnstitutunun “Yarımkeçirici və dielektriklərin texnologiyası” laboratoriyası

Dissertasiyanın müdafiəsi “\_12\_” \_\_\_dekabr\_\_\_ 2014-cü il saat “\_14\_” da Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Radiasiya Problemləri İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən D.01.221 Dissertasiya Şurasının iclasında olacaq.

Ünvan: AZ1143, B.Vahabzadə 9, Bakı ş.

Dissertasiya işi ilə AMEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq olar.

Avtoreferat “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2014-cü ildə göndərilmişdir.

**İxtisaslaşdırılmış Şuranın Elmi katibi:**  
**fizika –riyaziyyat elmləri doktoru, prof. O.Ə.Səmədov**

## ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı:** Yarımkeçirici materiallar əsasında hazırlanan günəş fotoçeviriciləri ekoloji cəhətdən təhlükəsiz, dayanıqlı, işləmə müddətinin uzun müddətli olmasına və praktiki istifadə edilməsinin sadəliyinə görə əlverişli enerji mənbələrindən biridir. Məhz bu üstünlüklərə görə yarımkeçirici fotoçeviricilərdən avtonom enerji mənbəyi kimi kosmik aparatların qidalandırılmasında və yerüstü işlərdə geniş istifadə edilir.

Təcrübi və elmi nəticələrin təhlili göstərir ki, fotoçeviricilər radiasiya sahəsində, xüsusən kosmik tədqiqat işlərində istifadə olunan zaman onların effektivliyi və xidmət müddəti kəskin azalır. Bu səbəbdən yarımkeçirici cihazların tətbiq imkanları məhdudlaşır. Aparılan tədqiqatlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, radiasiya şüalarının təsiri nəticəsində yaranan mütəhərrik defektlərin ilkin defektlərlə qarşılıqlı təsiri zamanı müxtəlif təbiətli mürəkkəb komplekslər yaranır. Belə defektlər rekombinasiya mərkəzi rolunu oynadığından fotoçeviricilərdə qısa qapanma cərəyanı, o cümlədən açıq dövrə gərginliyi kəskin azalır. Bu isə çeviricilərin effektivliyinin işləmə müddətinin azalmasına səbəb olur. Bu səbəbdən radiasiya şüalarının təsiri nəticəsində yarımkeçirici cihazlarda müşahidə edilən radiasiya effektlərinin yaranma səbəblərinin materialların xüsusiyyətlərindən asılılığının öyrənilməsi elmi və praktiki cəhətdən əhəmiyyətlidir. Qeyd olunan effektlərin öyrənilməsi yarımkeçirici materialların, o cümlədən onlar əsasında yaradılmış cihazların radiasiyaya davamlığının artırılma yollarının müəyyənləşdirilməsində mühüm rol oynaya bilər.

Son zamanlar yarımkeçirici materialların alınması və müxtəlif texnoloji aşınmalar zamanı yaranan defektlərin (nöqtəvi defektlər, Şottki defektləri, dislokasiyalar, komplekslər) təsirini tənzimləmək məqsədi ilə müxtəlif təsirlərdən- termik, optik və ultasəsdən istifadə olunur. Bu üsulların tətbiqi zamanı yaranan yeni defektlər materialın ilkin xassələrinin məqsədyönlü idarə edilməsinə imkan vermir. Bu səbəbdən materialın xüsusiyyətindən və defektlərin təbiətindən asılı olaraq texnoloji üsulun seçilmə zərurəti yaranır. Məsələn, son zamanlar radiasiya şüalanması zamanı yaranan defektlərin təbiətini, energetik parametrlərini və dayanaqlılığını öyrənmək məqsədi ilə termik və lazer dəmləmə üsullarından istifadə olunur. Qamma kvant, elektron, proton və neytronlarla

şüalandırılmış Si əsaslı fotoçeviricilərin tədqiqi zamanı müəyyən edilmişdir ki, termik dəmlənmə zamanı radiasiya defektlərinin qismən dəmlənməsi baş verir, eyni zamanda yeni tipli mürəkkəb və stabil defektlər yaranır. Bu səbəbdən radiasiya şüalarının təsiri nəticəsində yarımkeçirici strukturların diod parametrləri pisləşir. Alınmış təcrübə nəticələri göstərir ki, şüalanma və dəmlənmə temperaturundan asılı olaraq materialın parametrlərinin tam bərpası müşahidə olunmur. Bu işə, termik və optik dəmlənmə prosesi zamanı daha dayanıqlı defektlərin yaranması ilə bağlıdır. Qeyd olunan faktları nəzərə almaqla radiasiya şüalarının və digər xarici faktorların birləşmiş təsiri zamanı yaranan defektlərin bərpa olunma mexanizminin işlənilməsi məqsədi ilə yeni texnoloji üsulların tətbiq edilməsi radiasiya fizikasının aktual məsələlərindən biridir.

Bu problemin radiasiya materialşünaslığı üçün aktual olduğunu nəzərə alaraq təqdim edilən dissertasiya işinin mövzusu, şüalanma zamanı yaranan radiasiya defektlərinin dəmlənmə prosesinin tədqiqinə həsr edilmişdir.

Elmi ədəbiyyatda materialların alınması zamanı yaranan defektlərin (dislokasiya, nöqtəvi defektlərin, komplekslərin) ultrasəsle emal edilməsinə dair bir neçə işlər mövcuddur. Həmin işlərdə alınan nəticələr göstərir ki, ultrasəsle emal zamanı səthyanı oblasda mövcud (0,3-2mkm ) olan defektlərin dissosiasiya nəticəsində paylanması müşahidə olunur. Bu işə yükdaşıyıcıların sərbəst qaçış yolunun, relaksasiya müddətinin dəyişməsinə səbəb olur və dəmlənmə prosesi ultrasəs dalğasının tezliyindən və təsir müddətindən asılıdır. Qeyd olunan faktları nəzərə alaraq qamma- kvantların təsiri nəticəsində yaranan defektləri müalicə etmək məqsədi ilə ilk dəfə ultrasəs dalğalarının (USD) təsirindən istifadə edilmişdir.

Tədqiqat obyektinin silisium əsaslı p-n-n\* tipli günəş fotoçeviricilərinin seçilməsi, onların alınma texnologiyasının müasir tələblərə uyğun olması, fotoçeviricilərin quruluşu və xassələri haqqında dürüst məlumatların və geniş praktiki tətbiq sahələrinin olması ilə bağlıdır. Dəmlənmə prosesində 0.5-50 MHz tezlikli və intensivliyi 0.5- 2 Vt/m<sup>2</sup> olan ultrasəs dalğalarından istifadə edilmişdir. Alınan nəticələr termik dəmlənmə prosesi zamanı alınan nəticələrlə müqayisə edilmişdir.

**Dissertasiya işinin məqsədi**  $\gamma$ -kvantlarla şüalandırılmış p-n-n\* tipli silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin fotoelektrik xassələrinə ultrasəs dalğalarının (USD) təsir mexanizminin və qanunauyğunluqların müəyyən

edilməsi və radiasiya defektlərinin dəmləmə rejiminin optimal qiymətinin müəyyənləşdirilməsidir.

**Bu məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı məsələlərin həlli qarşıya qoyulmuşdur:**

- silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin elektrik və fotoelektrik xassələrinə, eləcə də bu xassələrə radiasiya şüalarının təsirinə dair mövcud məlumatları araşdırmaqla, dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığını əsaslandırmaq;
- silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin alınma üsullarının və onların ilkin xarakteristikalarının təhlili əsasında tədqiqat üçün nümunələri hazırlamaq;
- silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin fotoelektrik xarakteristikalarına qamma şüalarının təsirini tədqiq etmək və fotoenergetik parametrlərini müəyyən etmək;
- şüalandırılmış silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin fotoenergetik və diod parametrlərinin termik dəmləmə temperaturundan asılılığını müəyyən etmək;
- şüalandırılmış silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin fotoelektrik xarakteristikalarına ultrasəs dalğalarının (USD) təsirini tədqiq etmək;
- şüalandırılmış silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin fotoenergetik və diod parametrlərinə ultrasəs dalğalarının (USD) təsirinin müəyyən edilməsi.

**Tədqiqat obyektini** olaraq silisium əsaslı günəş fotoçeviriciləri seçilmişdir. Nümunələrin hazırlanması zamanı termik diffuziya üsulundan istifadə edilmişdir. Tədqiqat üçün hazırlanmış silisium əsaslı fotoelementlərin parametrləri:  $U_{ad}=570$  mV (açıq dövrə gərginliyi),  $I_{qk}=34$  mA/sm<sup>2</sup> (qısa qapanma cəryanı), f.i.ə.=13.95%,  $P_m=14$  mVt/sm<sup>2</sup> və  $ff=0,72$  olmuşdur.

**İşin elmi yeniliyi:** İlk dəfə olaraq qamma şüalarla müxtəlif dozalarda şüalandırılmış silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin ultrasəs dalğaları ilə dəmlənməsi:

- $\gamma$ -kvantlarla şüalandırılmış (100-2000 krad dozada) silisium əsaslı p-n-n<sup>+</sup> tipli günəş fotoçeviricilərində parametrlərin deqradasiya sürətinin şüalanma dozasından asılılığı və kritik dozanın qiyməti müəyyən edilmişdir.

- $\gamma$ - kvantlarla şüalandırılmış p-n-n<sup>+</sup> tipli günəş fotoçeviricilərinin ultrasəs dalğaları ilə dəmlənməsi zamanı qısa qapanma cərəyanının və açıq dövrə gərginliyinin dəyişmə mexanizmi və bu dəyişmənin qanunauyğunluğu müəyyən edilmişdir;
- $\gamma$ - kvantlarla şüalandırılmış p-n-n<sup>+</sup> tipli günəş fotoçeviricilərinin energetik parametrlərinin (ff,  $n_0$ , P) ultrasəs dalğaları vasitəsilə dəmlənmə sürəti şüalanma dozəsindən asılıdır və bu asılılıq deyri-xətti xarakter daşıyır;
- $\gamma$ - kvantlarla şüalandırılmış p-n-n<sup>+</sup> tipli günəş fotoçeviricilərində radiasiya defektlərinin ultrasəs dalğaları ilə dəmlənməsindən alınan nəticələrin təhlili göstərir ki, şüalanma dozasının 100 krad qiymətlərində yaranan defektlər sadə defektlərdir və 50 MHz tezlikli ultrasəs dalğası ilə 240 dəqiqə müddətində dəmlənmə nəticəsində tam yox olunur. Şüalanma dozalarının 500 krad-dan yüksək qiymətlərində yaranan defektlər öz təbiətinə görə daha mürəkkəb olduğundan, deqredasiya olmuş parametrlərin tam bərpası müşahidə olunmur;
- $\gamma$ - kvantlarla şüalandırılmış p-n-n<sup>+</sup> tipli günəş fotoçeviricilərinin ultrasəs dalğaları ilə dəmlənməsi zamanı müəyyən edilmişdir ki, spektrin 0,4-0,7 mkm oblastında fotoçeviricilərin fotohəssaslığının yüksəlməsi səthyanı oblastda yaranan radiasiya defektlərinin dəmlənməsi ilə bağlıdır;
- Radiasiya defektlərinin US dalğalarla dəmlənmə sürətinin şüalanma dozəsindən asılılıq qanunauyğunluğu və stabil defektlərin parametrləri müəyyən edilmişdir;

**İşin praktiki əhəmiyyəti** ondan ibarətdir ki, dissertasiya işində həll edilən məsələlər fotoçeviricilərin effektivliyinin artırılma üsulunun işlənilməsinə həsr edilmişdir. Qeyd olunan məsələnin həlli radiasiya mühitində işləyən silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin davamlılığını və eyni zamanda energetik parametrlərin stabilliyini artırmağa imkan verəcəkdir.

**Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:**  $\gamma$ - kvantlarla şüalandırılmış p-n-n<sup>+</sup> tipli günəş fotoçeviricilərində radiasiya defektlərinin ultrasəs dalğalarla dəmlənməsi zamanı:

- $\gamma$ - kvantlarla şüalandırılmış p-n-n<sup>+</sup> tipli günəş fotoçeviricilərində radiasiya defektlərinin dəmlənmə prosesinin US dalğalarının

tezliyindən və dəmləmə müddətindən asılılığının xüsusiyyətləri müəyyən edilməsidir;

- p-n-n<sup>+</sup> tipli günəş fotoçeviricilərində US dalğaları ilə dəmləmə prosesinin  $\gamma$ - kvantların şüalanma dozasından asılılıq mexanizmi müəyyən edilməsidir;
- p-n-n<sup>+</sup> tipli günəş fotoçeviricilərinin enerji parametrlərinin (ff,  $\eta$ , P) US dalğalarının gücündən asılılıq xüsusiyyətləri müəyyən edilmişdir;
- Qamma şüaların təsiri nəticəsində silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərində yaranan radiasiya defektlərinin termik dəmləmə temperaturundan asılılığının xüsusiyyətləri müəyyən edilmişdir;
- Qamma şüaların təsiri nəticəsində silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərində yaranan radiasiya defektlərinin ultrasəs dəmləmə tezliyindən və dəmləmə zamanından asılılığının xüsusiyyətləri aşkar edilmişdir.

**İşin aprobasiyası.** Dissertasiya işinin materialları aşağıdakı konfranslarda məruzə edilmişdir:

- The International Conference on Sustainable Developmen” (İran-Tabriz - 2013).
- “10th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering” (Baku-2014).
- “4th International Academic Conference of Young Scientists “Electric Power Engineering and Control” (Ukrain -Lviv - 2013);
- 7th Eurasian Conference, nuclear science and its application, (Baku-2014).

Dissertasiya işi Azərbaycan MEA Radiasiya Problemləri İnstitutunun birdəfəlik seminarında Azərbaycan MEA Fizika İnstitutunun nümayəndələrinin iştirakı ilə müzakirə olunmuş və müdafiə şurasına təqdim olunması tövsiyə edilmişdir.

Dissertasiyanın elmi və praktiki nəticələri xarici və respublika elmi-texniki jurnallarında və məcmuələrdə, eləcə də yuxarıda göstərilən konfrans və simpoziumların materiallarında dərc edilmişdir. **Nəşr.** Dissertasiya işinin əsas nəticələri 6-xarici və yerli periodik elmi jurnallarda dərc edilmiş və 4 konfransda məruzə edilmişdir.

**Dissertasiya işinin tərtibat quruluşu və həcmi.** Dissertasiya işi girişdən, 4-fəsilədən, nəticələrdən və 115 ədəbiyyat siyahısından ibarətdir.

Dissertasiya işinin ümumi həcmi 130 səhifədən, 35- qrafikdən və 10- cədvəldən ibarətdir.

Dissertasiya işində təqdim edilən materiallar haqqında qısa məlumat aşağıdakı formada təqdim edilmişdir.

## İŞİN QISA MƏZMUNU

**Girişdə** dissertasiya mövzusunun aktuallığı, işin məqsədi, elmi yeniliyi və qarşıya qoyulan məsələlər haqqında məlumatlar verilmişdir.

**Birinci fəsildə** yarımkeçirici materiallar əsasında yaradılan fotoçeviricilərin alınma üsulları, onların parametrləri və xarakteristikaları, həmçinin silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərində baş verən radiasiya prosesləri haqqında məlumatlar verilmişdir. Göstərilmişdir ki, günəş enerjisini elektrik enerjisinə çevirmə üsulları arasında fotoelektrik üsulu xüsusi yer tutur. Bu üsulun tətbiq edilməsi, onun sadəliyi və iqtisadi cəhətdən səmərəliliyi ilə bağlıdır. Belə fotoelementlər p-n- keçidlidir və spektrin 0.4-1.0 mkm oblastında yüksək fətohəssaslığa malikdirlər. Göstərilmişdir ki, silisium əsaslı fotoçeviricilərin radiasiya şüalarına davamlığını artırmaq məqsədi ilə Li- atomları ilə aşqarlanır. Şüalanma zamanı yaranan defektlərin Li –atomu ilə kompensasiya edilməsi elementlərin şüalanma şəraitində işləmə müddətini artırır.

Müasir nəzəri və təcrübi işlərin araşdırılması verilmiş və göstərilmişdir ki, fotoçeviricilərin effektivliyi - açıq dövrə gərginliyi- $U_{a.d}$ , qısa qapanma cərəyanı-  $I_{q.q}$ , faydalı iş əmsalı- $\eta$  və volt-ampere xarakteristikasının dolma əmsalı - FF ilə müəyyən edilir. Bu faktorlara xarici amillərin (temperaturun, elektrik sahəsinin, radiasiya şüalarının) təsirləri və onların təsirini tənzimləmə üsulları haqqında geniş şərh verilmişdir. Alınmış nəticələr əsasında radiasiya defektlərinin dəmlənmə prosesinin ultrasəs dalğalarının tətbiq edilmə səbəbləri müəyyən edilmişdir. Fəslin sonunda fotoelementlərin faydalı iş əmsalının yüksəldirməsi yolları və onların fotoenergetik parametrlərinə ionlaşdırıcı şüaların və qamma kvantların təsiri haqqında məlumatlar verilmişdir. Alınmış təcrübi və nəzəri nəticələr əsasında dissertasiya işinin aktuallığı, elmi yeniliyi və qarşıya qoyulan məsələlər müəyyən edilmişdir. Ədəbiyyat məlumatlarının araşdırılması nəticəsində dissertasiya işinin məqsədi və həll ediləcək məsələlər müəyyənləşdirilmişdir.



**İkinci fəsildə** fotoçeviricilərin alınma üsulu, elektrik, fotoelektrik və volt-ampere xarakteristikalarının ölçülmə üsulları, həmçinin onların energetik parametrlərinin təyin olunma qaydaları göstərilmişdir. Dissertasiya işində tədqiq olunan silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərinin hazırlanması zamanı termik diffyziya üsulundan istifadə edilmişdir. Fotoçevirici strukturunun yaradılması üçün p-tipli monokristal silisium (p-tipdə də dəşiklərin kansanterasiyası:  $N_a \approx 1 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ) fosfor atomu ilə aşqarlanmışdır. n-tip silisiumda (n-Si) elektronların konsentrasiyası  $N_d \approx 1 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$  olmuşdur. Yaranan p-n strukturun üst təbəqəsinin qalınlığı  $d_n \approx 0.3 \text{ } \mu\text{m}$  və alt təbəqənin qalınlığı  $d_p \approx 300 \text{ } \mu\text{m}$ -ə bərabərdir.

Silisium əsaslı fotoçevirici nümunələrin A və  $I_0$  parametrləri qaranlıqda düz istiqamətdə tətbiq edilən gərginlik zamanı volt-ampere xarakteristikasından təyin edilmişdir. Bu məqsədlə  $I \sim f(U)$  asılılığı qurulmuş və onun xətti hissələrini gərginlik oxuna nəzərən ekstrapolyasiyasından doyma cərəyanının-  $I_0$ -in qiymətləri müəyyən edilmişdir. Həmin xətti hissələrin  $\Delta J = J_1 - J_2$  və  $\Delta U = U_1 - U_2$  qiymətləri əsasında A əmsalının qiyməti təyin edilmişdir. Düz istiqamətdə volt-ampere xarakteristikaları adi diodlarda olduğu kimi, uç hissədən –düzxətli, eksponensial və kəskin qalxma oblastlarından ibarətdir. Cərəyanın kəskin qalxma oblastını ekstrapolyasiya etməklə kəsişmə gərginliyi təyin edilmişdir.

Fəslin sonunda elementlərin  $\text{Co}^{60}$  izotopundan istifadə edilən şüalanma qurğusunda şüalandırma qaydası, radiasiya defektlərinin termik və ultrasəs üsulları ilə dəmlənmə prosesinin aparılması haqqında məlumatlar verilmişdir.

Qamma şüalar ilə deqradasiya olmuş silisium əsaslı fotoçeviricilərin parametrlərini bərpa etmək üçün yüksək tezlikli elektromaqnit dalağalarından istifadə olunmuşdur. Qamma şüaların təsiri nəticəsində yaranan defektlərin dəmlənməsi üçün silisium fotoelementinə G4-102 tezlik genratorundan istifadə edərək pyezo-element tərəfindən buraxılan 0,1 -50 MHzs tezlikli ultrasəslə təsir edilmişdir.

**Üçüncü fəsildə** p-n-n\* tipli fotoçeviricilərin elektrik və optik xassələrinə  $\gamma$ -kvantların təsiri və termik dəməmə prosesinin p-n-n\* tipli silisium fotoçeviricilərinin elektrik və optik xassələrinə təsiri araşdırılmışdır. Şüalanmadan əvvəl elementlər üç qrupa bölünmüş və onların xarakteristikaları müxtəlif dozalı  $\gamma$ -kvantlarla şüalandırıldıqdan

sonra tədqiq edilmişdir. Nümunələr qamma şüalarla otaq temperaturunda 100, 500, 1000 və 2000 krad doza ilə şüalandırılmışdır. Şüalandırılmış nümunələrin ikinci qrupu temik dəmləmə, üçüncü qrupu isə ultrasəsle emal edilmək üçün ayrılmışdır.

Fotoçeviricilərin düz istiqamətdə volt-ampere xarakteristikaları (VAX) şüalanmadan əvvəl və sonra tədqiq edilmişdir. Düz istiqamətdə tətbiq edilən gərginlik zamanı volt-ampere xarakteristikaları uç hissədən-düzxətli, eksponensial və kəskin qalxma oblastlarından ibarətdir. Cərəyanın kəskin qalxma oblastini ekstrapolyasiya etməklə kəsişmə gərginliyi təyin edilmiş və 0,35 V olmuşdur. Müəyyən edilmişdir ki,  $\gamma$ -kvantlarla şüalanma zamanı nümunələrin volt-ampere xarakteristikaları daha kiçik gərginlik tərəfə sürüşür. Alınmış nəticələrdən görünür ki, şüalanma dozası artdıqca kəsişmə gərginliyi 0,35 V-dan 0,22 V -a qədər azalır. Bu faktların araşdırılması göstərir ki, düz istiqamətdə gərginlik düşgüsünün azalması həcmi yüklər oblastının eninin artması nəticəsində baş verir və şüalanma nəticəsində yaranan defektlərin donor təbiətli olduğunu göstərir. Müəyyən edilmişdir ki, tətbiq edilən gərginliyin kiçik qiymətlərində ( $U < 2-3 kT/q$ ) cərəyan omik qanuna tabe olur. Klassik Şokli və Sa-Noysa-Şokli nəzəriyyələri əsasında p-n keçidin müqaviməti hesablanmış və təcrübi nəticələrlə müqayisə edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, təcrübi nəticələr əsasında alınmış qiymətlər Sa-Noysa-Şokli nəzəriyyəsinə uyğun gəlir və şüalanma dozasının aşağı və yüksək qiymətlərində p-n keçidin müqaviməti azalır. Bu isə, cərəyanın həcmi yüklər oblastında baş verən rekombinasiya prosesi ilə bağlı olduğunu göstərir.  $\lg J \sim f(\lg U)$  asılılığı qurulmuş və onun xətti hissələrinin gərginlik oxuna nəzərən ekstrapolyasiyasından doyma cərəyanının  $J_0$  -in qiymətləri müəyyən edilmişdir Əyriyədən hesablanmış diod əmsallarının qiyməti ( $A$  və  $j_0$ ) uyğun olaraq  $1,2-1,6$  və  $2 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7} A/cm^2$  intervalında dəyişir.  $A$  və  $j_0$  -nin dəyişmə dinamikası cərəyanın keçmə mexanizminin həcmi yüklər oblastında baş verən generasiya-rekombinasiya prosesi ilə bağlı olduğunu göstərir.  $J_0$  və  $A$  -nın alınmış qiymətlərinin Şotki və Şokli -Noysa-Saa modelləri ilə müqayisəsi əsasında cərəyanın axma mexanizmi müəyyən edilmiş və göstərilmişdir ki, p-n-n\* tipli silisium fotoçeviricilərində cərəyanın keçmə mexanizmi həcmi yüklər və kvazineytral oblastlarda baş verən generasiya-rekombinasiya prosesləri ilə müəyyən edilir.

Şüalandırılmış nümunələrin yuk VAX-ı şüalanmadan əvvəl və sonra ölçülmüşdür. Qamma kvantlarla müxtəlif dozalarda şüalandırılmış Si əsaslı fotoelementdə  $P=100 \text{ mVt/ sm}^2$  işıqlanma zamanı alınan volt-ampere xarakteristikasından görünür ki, 100 krad qamma dozasi ilə şüalandırılmış nümunədə  $I_{qq} = 33 \text{ mA/ sm}^2$ ,  $V_{ad} = 560 \text{ mV}$ ,  $ff= 0.67$  və f.i.ə. 12.47% olmuşdur. Şüalanmanın yüksək qiymətlərində isə (məsələn, 1000 krad) nümunədə  $I_{qq} = 30 \text{ mA/ sm}^2$ ;  $V_{ad} = 547 \text{ mV}$ ;  $ff=0.66$ ; və  $\eta= 10.87\%$  qiymətləri təyin edilmişdir. Fotoelementin VAX-dan bütün fotoelektrik parametrləri təyin edilə bilər. Qamma şüalanmanın təsiri ilə nümunələrdə qısa qapanma cərəyanında və f.i.ə.-ında kəskin azalma baş verir. Açıq dövrə gərginliyi isə qismən azalır. VAX-ın dolma əmsalında heç bir əsaslı variasiya yoxdur, VAX- dolma əmsalı bəzi hallarda artır və ya nisbətən sabit qalır. Qamma şüalarının təsiri ilə qısa qapanma cərəyanının azalması əsas yükdaşıyıcıların yaşama müddəti ilə əlaqədardır. Qamma şüalanmanın təsiri ilə kristalda yaranmış defektlər rekombinasiya mərkəzi rolunu oynayaraq qeyri-əsas yükdaşıyıcıların yaşama müddətini ( $\tau$ ) azaldır. Yükdaşıyıcıların yaşama müddətinin azalması nəticəsində silisium fotoelementlərində fotoelektrik parametrlərdə deqradasiya baş verir.

Müxtəlif dozada qamma kvantlar ilə şüalandırılmış silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərində qısa qapanma cərəyanının açıq dövrə gərginliyindən asılılığının  $\ln I_{qq} \sim f(v_{ad})$  tədqiqi göstərir ki, qamma şüalar ilə yüksək dozada şüalanmış nümunələrdə  $dI/dV$  nisbəti artır və  $A$  və  $I_0$  parametrləri kəskin dəyişir. Bu nəticələr göstərir ki, Si fotoelementlərində fotocərəyan həcmi yüklər oblastında baş verən rekombinasiya prosesi ilə müəyyən olunur. Qamma şüalarla şüalandırılmış nümunələrdə şüalanmadan əvvəl müşahidə olunan qanunauyğunluq yenidən müşahidə edilir.  $I_{qq} \sim f(U_{ad})$  asılılığının qamma kvantlarının dozasından asılılığı göstərir ki, şüalanmanın yüksək dozalarında fotocərəyan azalır, ancaq əyrilərin meyli dəyişmir. Bu isə şüalanma zamanı yaranan radiasiya defektlərinin konsentrasiyasının şüalanma dozasından asılılığının eksponensial qanunla dəyişdiyini göstərir.

Silisium fotoçeviricilərində  $U_{ad}$  və  $I_{qq}$  -nin təcrübi qiymətlərinin işıq selinin gücündən asılılığı müxtəlif şüalanma dozalarında təyin edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki,  $V_{ad} \sim f(P)$  asılılığı şüalanmadan əvvəl və sonra eksponensial xarakter daşıyır. Şüalanmanın 200 krad qiymətindən sonra  $V_{ad}$ -gərginliyinin azalması və doyma gərginliyin qiymətinin işıq selinin

gücünün daha kiçik qiymətlərinə tərəf sürüşməsi müşahidə olunur.  $I_{qq} \sim f(P)$  asılıqlarında isə fotocərəyanın eksponensial qanunla azalması müəyyən edilir. Alınmış təcrübi nəticələr şüalanma zamanı yaranan defektlərin kontaktyanı və həcmi yüklər oblastında yarandığını göstərir.

P-n-n\* tipli silisium fotoçeviricilərinin spektral xarakteristikasına  $\gamma$ -kvantların təsiri araşdırılmışdır. Araşdırmalar göstərir ki, şüalanma dozasının  $\Phi < 100$  krad qiymətlərində spektrin uzun və qısa dalğa hissəsində fotoçeviricilərin spektral həssaslığının cüzi artması müşahidə olunur.  $\Phi > 100$  krad qiymətlərində isə, spektrin qısadalğalı oblastında spektral həssaslığın uzundalğalı oblasta nəzərən daha kəskin azalması müşahidə olunur. Bu isə, şüalanma zamanı yaranan defektlərin səthyanı oblastda üstünlük təşkil etdiyini göstərir. Spektrin qısadalğalı oblastında fotohəssaslığın azalması səth və səthyanı oblastda yaranan radiasiya defektlərinin rekombinasiya mərkəzi rolunu oynadığını göstərir. Bu defektlər fotoyükdaşıyıcılar üçün rekombinasiya mərkəzi rolunu oynayır və nəticədə yükdaşıyıcıların səth rekombinasiya sürətini artırır. Qeyd olunmalıdır ki, rekombinasiya mərkəzlərinin konsentrasiyası qamma şüalanmanın dozasından asılıdır və alınan nəticələrdə bu asılılıq təsdiqlənmişdir.

Şüalanma zamanı yaranan defektlərin xarakteristikasını müəyyən etmək məqsədi ilə nümunələrin izoxron dəmlənməsi müxtəlif temperaturalarda və dəmləmə müddətlərində aparılmışdır. Aparılmış tədqiqatlar sayəsində termik dəmləmənin optimal rejimi seçilmişdir. Şüalandırılmış p-n-n\* tipli Si elementlərinin dəmlənməsi U8 tipli termostatda aparılmış və dəmləmə temperaturunun xətası  $\pm 0,1^\circ$  olmuşdur. İzoxron dəmləmənin müddəti 30-60 dəqiqə seçilmişdir. Hər dəmləmə prosesindən sonra nümunələrin VAX qaranlıq və işıqlanma halında tədqiq edilmişdir.

Müxtəlif dozalarda şüalandırılmış p-n-n\* tipli Si elementlərinin düz istiqamətdə VAX-nın dəmləmə temperaturundan asılılığı tədqiq edilmişdir ( $\Phi_1=100$ ,  $\Phi_2=2000$  krad;  $T_{\text{şüal.}}=300$  K,  $T_1=100-250^\circ$  S;  $t=30\div 60$  dəqiqə). Müəyyən edilmişdir ki, dəmləmə temperaturundan asılı olaraq volt – amper xarakteristikalarının tədricən bərpası müşahidə olunur. Alınmış nəticələrin təhlili göstərir ki, ilkin şüalanma selində yaranan radiasiya defektləri Frenkel cütündən ibarətdir və onların dəmlənməsi elektron selinin intensivliyindən asılı olaraq iki mərhələdə müşahidə olunur. Müəyyən

edilmişdir ki, I- mərhələdə 100 krad doza ilə şüalandırılmış nümunələrdə yaranan defektlərin dəmlənməsi temperaturun 150 °C, 200 °C və 250 °C intervalında müşahidə olunur.

Qamma şüalarla şüalandırılmış silisium fotoelementlərinin 50 °C, 200 °C və 250 °C temperaturlarda dəmlənməsindən sonrakı VAX-ın analizi göstərir ki, radiasiya defektlərinin dəmlənmə prosesi şüalanma dozasından və temperaturdan asılıdır. Aşağı dozlarda (100 krad) şüalandırılmış nümunələrin  $T_1=150$  °C,  $T_2=200$  °C,  $T_3=250$  °C temperaturlarında dəmlənməsi zamanı defektlərin dissosiasiyası nəticəsində nümunələrdə fotoenergetik parametrlər qismən bərpa olunur. Yüksək dozalarla şüalandırılmış nümunələrin parametrlərinin termik dəmləmə vasitəsi ilə bərpası müşahidə olunmur. Alınmış təcrübə nəticələrin təhlili göstərir ki, şüalanma dozasının 100 krad qiymətlərində yaranan defektlər sadə defektlərdir və 150-250 °C temperatur intervalında dəmləmə zamanı yox olur. Silisium fotoelementinin şüalanma dozası 500 krad olduqda yaranan defektlərin termik dəmlənməsi qismən baş verir .

Yüksək dozada (1000 və 2000 krad) qamma kvant ilə şüalandırılmış p-n-n\* tipli Si elementlərində yaranan defektlərin 150-250°C temperatur intervalında termik dəmlənməsi zamanı nümunələrin ilkin vəziyyətə cüzi qayıdışı baş verir. Bu halda silisium kristalında yaranan defektlər öz təbiətinə görə daha mürəkkəb olurlar. Alınmış nəticələrdən demək olar ki, silisium qəfəsində radiasiyanın təsiri nəticəsində yaranan Frenkel cütləri aşqar atomları ilə qarşılıqlı əlaqəyə girərək daha mürəkkəb defektlər yaradır. Belə defektlər silisium fotoelementində A və  $I_0$  - parametrlərinin qiymətinin artmasına səbəb olur. Qamma kvantların təsiri ilə yaranan defektlərin dəmlənmə sürəti şüalanma dozasından asılıdır və dəmləmə müxtəlif temperatur intervallarında baş verir. Alınmış nəticələr göstərir ki, fotoelekterik parametrlərin şüalanma dozasından asılı olaraq dəyişməsi, defektlərin təbiətindən də asılıdır. Kiçik şüalanma dozalarında yaranan nöqtəvi defektlər ilkin defektlərlə qarşılıqlı təsir zamanı baş verən radiasiya stimullaşdırıcı proseslər nəticəsində parametrlərin deqradasiyasının zəif olması (f.i.ə. 13.95% -dən 12.5% -ə, ff- 0,72-dən 0,67-ya dəyişməsi) nümunələrin qamma şüalarına qarşı davamlılığının yüksək olmasını göstərir. Yüksək dozalarda isə (şüalanma dozalarının 500 krad -dan böyük qiymətlərində) parametrlərin deqradasiyasına səbəb silisium fotoelementlərində sərhəd oblastında yaranan mürəkkəb

komplekslərin rekombinasiya mərkəzi rolunu oynamasıdır. Bu nəticə açıq dövrə gərginliyinin ( $U_{ad}$ ) yüksək qamma şüalanma dozalarında azalması ilə təsdiq edilir.

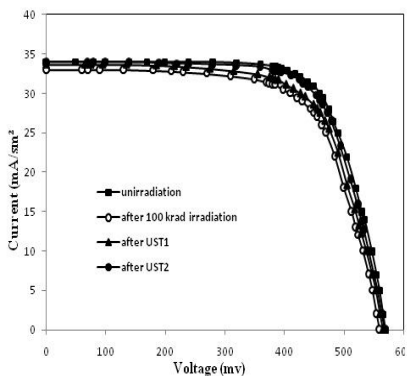
P-n-n\* tipli Si elementlərinin izoxron dəmlənmənin kinetikasi tədqiq edilmişdir ( $\Phi_1 = 100$  və  $\Phi_2 = 2000$  krad). Hər iki nümunədə müşahidə olunan dəmlənmənin birinci mərhələsi defektlərin eyni təbiətli olduğunu göstərir və izotermik dəmləmə əyrilərindən radiasiya defektlərinin dəmlənməsinin aktivləşmə enerjisi hesablanmış və 0,25 eV olmuşdur. Bu işə şüalandırılmış nümunələrdə doyma cərəyanının temperatur asılılığından müəyyən edilmiş mərkəzin aktivləşmə enerjisinə uyğun gəlir. Şüalandırılmış nümunələrin izoxron dəmlənməsi zamanı müəyyən edilmişdir ki, radiasiya defektlərinin stabilliyi şüalanma selinin intensivliyindən asılıdır. Aşağı şüalanma dozalarında yaranan radiasiya defektlərinin konsentrasiyası ilkin defektlərin konsentrasiyası tərtibində olduğundan, dəmlənmənin birinci mərhələsində ilkin defektlər keçiricilikdə əsas rol oynayırlar, yüksək şüalanma dozalarında isə mütəhərrik defektlərin ilkin defektlərlə qarşılıqlı təsiri nəticəsində yaranan mürəkkəb defektlər nümunələrin energetik parametrlərinin bərpa olunmasına təsir göstərir.

**Dördüncü fəsil**də qamma şüalarla şüalandırılmış p-n-n\* tipli Si elementlərinin elektrik və fotoelektrik xassələrinə ultrasəs dalğalarının təsirinin tədqiqindən alınan nəticələr verilmişdir. Alınmış nəticələrin termik dəmləmə zamanı alınan nəticələrlə müqayisəsi zamanı elmi ədəbiyyatda olan nəzəri və təcübi məlumatlardan istifadə edilmişdir. Şüalanma zamanı p-n-n\* tipli Si elementlərində yaranan radiasiya defektlərinin yüksək tezlikli ultrasəs dalğaları ilə emalı otaq temperaturunda 0,1-50 MHz tezlik diapazonunda aparılmışdır.

Şüalanmaya məruz qalan nümunələrin fotoenergetik parameterlərini bərpa etmək üçün hazırlanan nümunələr iki mərhələdə pyezo-lövhə vasitəsilə yaradılan ultrasəs dalğalarının təsirinə məruz qalmışdır. Qeyd edək ki, ultrasəs dalğasının tezliyinin  $H < 50$  MHz –dən aşağı qiymətlərində defektlərin emalı müşahidə olunmadığından, nümunələr 50 MHz tezlikli dalğalarla emal edilmişdir. Ultrasəs dalğalarının intensivliyi  $0,1-5$  Vt/m<sup>2</sup> diapazonunda seçilmiş və nümunələr  $90 \pm 240$  dəq müddətində emal edilmişdir. Emalın birinci mərhələsində ( $UST1$ ) -  $f_{UST1} = 50$  MHz; təsir etmə müddəti  $t = 90$  dəqiqə olmuşdur. Ultrasəs bərpasının ikinci mərhələsi ( $UST2$ ) belə şəraitdə edilmişdir:  $f_{UST2} = 50$  MHz;

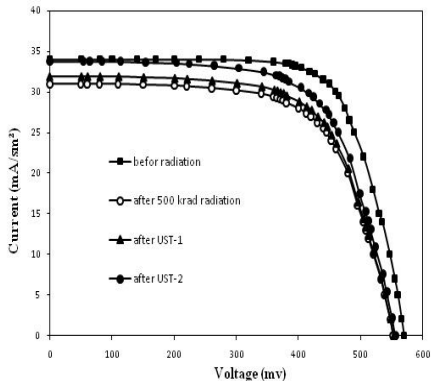
təsir etmə müddəti  $t=240$  dəqiqə. Alınan nəticələr qamma kvantlarla şüalanmadan əvvəl və sonra əldə edilmiş nəticələrlə müqayisə edilmişdir.

Şüalandırılmış nümunələrin yuk VAX-ı ultrasəs dalğarı ilə emaldan əvvəl və sonra ölçülmüşdür. Şəkil 1-də və 2-də 100 və 500 krad dozalı qamma kvantlarla şüalandırılmış nümunələrə ultrasəs dalğalarının  $t_1=90$  dəq. və  $t_2=240$  dəqiqə müddətində emalı zamanı alınan nəticələr göstərilmişdir. Şəkil 1-dən görüldüyü kimi, 100 krad qamma şüalanma dozaları ilə şüalandırılmış silisium nümunələrində ultrasəs dalğaları ilə emaldan sonra volt –amper xarakteristikalarının tam bərpası müşahidə olunur. 500 krad doza ilə şüalandırılmış nümunələrdə isə, hər iki emal mərhələsindən sonra qismən bərpa baş verir. Şəkil 1 və 2- nin müqayisəsindən görünür ki,  $I_{qq}$ -cərəyanı və  $U_{ad}$ -gərginliyi 100 krad şüalanmadan sonra tam bərpa olunur, 500 krad doza ilə şüalandırıldıqda isə  $I_{qq}$ -cərəyanı və  $U_{ad}$ -gərginliyi dismən bərpa olunur. Bu isə şüalanma zamanı yaranan defektlərin təbiətinin müxtəlif olması ilə bağlıdır. Yüksək şüalanma dozalarında (1000; 2000 krad) yaranan defektlər isə 50-60 % emal olunur. Bu isə, şüalanmanın yüksək intensivliyində yaranan defektlərin mürəkkəb xarakterə malik olduğunu göstərir. Şəkil 3-də 500 krad doza ilə şüalandırılmış nümunələrdə qısa qapanma cərəyanının nisbi dəyişməsi ( $I_{qq}/I_{qq_0}$ ), f.i.ə -nın nisbi dəyişməsi ( $\eta/\eta_0$ ) və açıq dövrə gərginliyinin müxtəlif emal müddətlərində nisbi dəyişməsi ( $V_{ad}/V_{ad_0}$ ) göstərilmişdir. Şəkil 3-dən görünür ki, qamma kvantlarla 500 krad dozada şüalanma zamanı energetik parametrlərin nisbəti-  $I_{qq}/I_{qq_0}$ - 9%,  $V_{ad}/V_{ad_0}$ - 7%,  $\eta/\eta_0$ - 20% azalır (2-sütununa görə), 90-dəqiqə ultrasəs (50 MHz) dalğaları ilə emal edildikdən sonra nisbi parametrlərin bərpası  $I_{qq}/I_{qq_0}$ - 5%,  $V_{ad}/V_{ad_0}$ - 2%,  $\eta/\eta_0$ - 10% olur (3-sütununa görə). Şüalanmadan sonra 240 dəqiqə ultrasəs dalğaları ilə emal etdikdə isə, parametrlərin nisbi bərpası-  $I_{qq}/I_{qq_0}$ - 3%,  $V_{ad}/V_{ad_0}$ -tam,  $\eta/\eta_0$ - 10% bərpa olunur. Müəyyən edilmişdir ki, 100 krad doza ilə şüalanmış nümunənin 50 MHz tezlikli ultrasəs dalğaları ilə 90÷240 dəqiqə müddətində emalı zamanı energetik parametrlərin tam bərpası müşahidə edilir. Bu isə, yaranan defektlərin sadə defekt olmasını göstərir. 1000-2000 krad doza ilə şüalandırılmış nümunələrdə isə, defektlər ultrasəs proses ilə qismən aradan qalxır. Bu isə, yaranan defektlərin mürəkkəb təbiətə malik olmasını göstərir.



şəkil 1

Qamma şüalarla 100 krad dozada şüalandırılmış silisium fotoelementinin volt- amper xarakteristikalarına ultrasəs təsiri

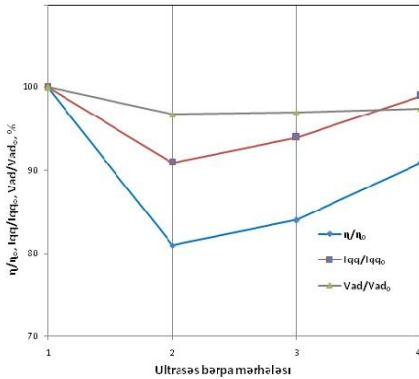


şəkil 2

Qamma şüalarla 500 krad dozada şüalandırılmış silisium fotoelementinin volt- amper xarakteristikalarına ultrasəs təsiri

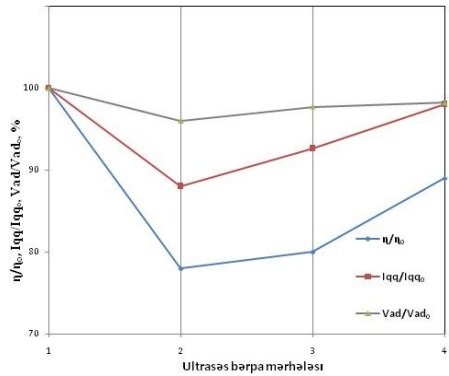
Belə ki, qamma-kvantların təsiri ilə Si qəfəsində yaranan Frenkel cütlərinin, yəni vakansiya və düyünlər arası atomların bir qismi aşqar atomları ilə qarşılıqlı əlaqəyə girərək daha mürəkkəb komplekslər yaradır, digər qismi isə annihilasiya edərək neytral hala keçir. Mürəkkəb defektlər yükdaşıyıcılar üçün rekombinasiya-generasiya mərkəzi rolunu oynadığından, p-n keçidin elektrik keçiriciliyini dəyişir. Alınan nəticələr əsasında demək olar ki, qısa qapanma cərəyanının azalması p-n keçidin baza və səthyanı oblastda yaranan, açıq dövrə gərginliyinin azalması isə p-n keçiddə yaranan radiasiya defektlərinin hesabına baş verir. Şüalandırılmış nümunələrin ultrasəs dalğaları ilə emalı zamanı, qeyd olunan parametrlərin nisbi dəyişməsinin ultrasəs dalğalarının intensivliyindən və emal müddətindən asılı olduğu aşkar edildi. Müəyyən edildi ki,  $\Phi < 500$  krad doza ilə şüalandırılmış nümunələri intensivliyi  $5 \text{ Vt/m}^2$  və tezliyi 50 MHz olan ultrasəslə 240 dəqiqə müddətində emal etdikdə energetik parametrlərin - açıq dövrə gərginliyinin 3%, qısa qapanma cərəyanının 12% və f.i.ə-nın 11% bərpası baş verir.  $\Phi > 500$  krad doza ilə şüalandırıldıqda isə parametrlərin - açıq dövrə gərginliyinin 2.2%, qısa qapanma cərəyanının 6% və f.i.ə-nın 7% qismən bərpası baş verir (şəkil 4). Təcrübə nəticələrin müqayisəsi göstərir ki, radiasiya defektlərinin dəmlənmə prosesi defektlərin təbiətindən, ultrasəs dalğalarının intensivliyindən və emal müddətindən asılıdır.





şəkil 3

Muxtəlif mərhələlərdə qısa qapanma cəryənin ( $I_{qq}/I_{q0}$ ), f.i.ə -nin ( $\eta/\eta_0$ ) və açıq dövrə gərginliyinin ( $V_{ad}/V_{ad_0}$ ) nisbi miqdarının dəyişməsi: (1) şüalanmadan əvvəl; (2) 500 krad qamma şüası ilə şüalanmış; (3) UST<sub>1</sub>sonra; (4) UST<sub>2</sub> sonra ( $t_1=90$ ;  $t_2=240$  dəqiqə).



şəkil 4

Muxtəlif mərhələlərdə qısa qapanma cəryənin ( $I_{qq}/I_{q0}$ ), f.i.ə -nin ( $\eta/\eta_0$ ) və açıq dövrə gərginliyinin ( $V_{ad}/V_{ad_0}$ ) nisbi miqdarının dəyişməsi: (1) şüalanmadan əvvəl; (2) 500 krad qamma şüası ilə şüalanmış; (3) UST<sub>1</sub>sonra; (4) UST<sub>2</sub> sonra ( $t_1=90$ ;  $t_2=240$  dəqiqə).

Elmi ədəbiyyatlarda verilən nəticələrə görə, kristalların xassələrinin ultrasəs dalğasının təsiri ilə dəyişməsi materialda olan quruluş defektlərinin, yəni kristalların alınması və texnoloji əməliyyatların aparılması zamanı yaranan defektlərin (dislokasiyaların, komplekslərin, sadə defektlərin) çevrilməsi ilə bağlıdır. Müəyyən edilmişdir ki, yarımkəçirici materiallarda akustik-stimullaşdırıcı proseslər kristallarda mövcud olan defekt mərkəzləri tərəfindən udulan ultrasəs dalğasının enerjisi ilə təyin edilir. Defekt tərəfindən udulan enerji nizamsız paylanan defektlər toplusunun parçalanmasını və nöqtəvi defektlərin diffuziya nəticəsində yenidən paylanmasını oblast əhatəsində sürətləndirir. Bu isə defektli kristallarda yükdaşıyıcıların konsentrasiyanın, yüüklüyünün və relaksasiya müddətinin dəyişməsinə idarə etməyə imkan verir. Yarımkəçirici materiallarda radiasiya şüalarının təsiri nəticəsində yaranan defektlər (Frenkel cütləri) kristalın quruluş defektlərindən fərqli olaraq mütəhərrik defektlərdir və onlar miqراسiya etmək qabiliyyətinə malikdirlər. Defektli kristallarda yaranan radiasiya defektləri quruluş defektləri ilə qarşılıqlı təsir nəticəsində qismən kompensasiya olunur və ya stabil komplekslər yaranır. Tədqiqat obyektini olaraq seçilmiş p-n-n\* tipli Si elementlərində aşqar atomu olaraq bor elementindən istifadə olunmuşdur. Belə strukturlu p-n keçidlərə qamma kvantlarla təsir edilən zaman Frenkel cütləri yaranır və onların dissosiasiya nəticəsində p-n keçiddə və onun

sərhədyanı oblastında mütəhərrik  $[V_{Si} I_B]$  və ya  $[I_{Si} V_B]$  tipli komplekslər yaranır. Ultrasəs dalğalarının təsiri nəticəsində sadə defektlərin stimullaşdırıcı diffuziyası və komplekslərin dissosasiya sürətlərinin intensivliyi artdığından, defektlərin dəmlənmə prosesi daha intensiv baş verir. Bu səbəbdən p-n keçiddə yükdaşıyıcıların yaşama müddəti artır və ilkin energetik parametrlər bərpa olunur.

Şüalandırılmış monokristal silisium əsaslı günəş fotoçeviricilərində düz istiqamətdə qaranlıq volt-ampər xarakteristikalarının ultrasəs dəmləmə mərhələsindən asılılığı nəticələrinin təhlili göstərir ki, şüalanma dozasının 100 krad qiymətlərində yaranan defektlər sadə defektlərdir və 240 dəqiqə 50 KHz səs dalğası ilə emal zamanı müşahidə olunmur. Yüksək dozalarda (500, 1000, 2000 krad) şüalanmadan sonra ultrasəslə dəmlədikdə Si nümunələrində parameterlərin bərpası qismən baş verir və şüalanma nəticəsində yaranan defektlər öz təbiətinə görə daha mürəkkəb olurlar. Ultrasəs dalğasının təsiri zamanı udulan enerjinin kompleksin dissosasiya enerjisinə üstün gələ bilməməsi nəticəsində dəmləmə prosesi qismən baş verir.

Beləliklə p-n-n\* tipli Si fotoelementinin yüksək şüalanma dozası ilə (500, 1000, 2000 krad) şüalanması nəticəsində yaranan defektlər öz təbiətinə görə daha mürəkkəb komplekslərdən ibarət olduğundan, elastiki dalğalarla qarşılıqlı təsir zamanı udulan enerji defektlərin transformasiyasına imkan vermir. Bu səbəbdən ultrasəslə emalı zamanı radiasiya defektlərinin qismən dəmlənməsi baş verir.

Şüalandırılmış nümunələrin yüksək tezlikli ultrasəs dalğaları ilə dəmlənməsi zamanı şüalanma dozasının qiymətindən asılı olaraq defektlərin dəmlənmə prosesinin müxtəlif mərhələdə baş verməsi də yaranan defektlərin təbiətinin müxtəlif olmasını göstərir. Spektral xarakteristikaların tədqiqi göstərir ki, qamma şüaların dozasından asılı olaraq p-n-n\* tipli silisium fotoelementlərində spektrin qısa dalğa oblastında fotohəssaslıq uzun dalğa oblastına nəzərən daha kəskin dəyişir. Buna səbəb şüalanma zamanı sətyanı oblasda yaranan mərkəzlərin qeyri-əsas yükdaşıyıcıların rekombinasiya sürətini artırmasıdır. p-n-n\* strukturlu keçidin baza hissəsində aşqar atomlarının paylanma qradienti şüalanma istiqamətinə qarşı olduğundan, baza oblastında yaranan defektlərin həcmi yüklər oblastına diffuzuya etməsi nəticəsində baza oblastında radiasiya defektlərinin konsentrasiyası azalır. Bu isə, şüalanma zamanı

fotohəssaslığın nisbətən az dəyişməsinə səbəb olur. Nümunələrin termik dəmlənməsi zamanı p-n-n\* keçidin fotohəssaslığı uzundalğalı oblastda tam, qısdalğalı oblastda isə qismən bərpa olunur. Şüalandırılmış p-n-n\* keçidin ultrasəs dalğası ilə emalı zamanı dəmləmə prosesinin ultrasəs dalğasının imntensivliyindən və emal müddətindən asılı olduğu müəyyən edilmişdir. 100 krad doza ilə şüalandırılmış nümunələr  $2 \text{ Vt/m}^2$  intensivlikli ultrasəslə  $t_1=90$  dəqiqə və  $t_2=240$  dəqiqə müddətində emal edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, nümunələrin fotohəssaslığı bütün spektr boyu bərpa edilir. 500 krad və daha yüksək dozalarda şüalandırılmış nümunələrin 240 dəqiqə müddətində ultrasəslə emalı zamanı p-n-n\* keçidin fotohəssaslığı qısdalğa oblastında qismən, uzundalğa oblastında isə tam bərpa olunur. Ultrasəs dalğaları ilə emal zamanı qısdalğa oblastında fotohəssaslığın artması p-oblastla n-n\* -in sərhəd oblastında yüksəkomlu layın yaranması hesabına həcmi yüklər oblastının səthə doğru genişlənməsidir. Bu zaman pozulmuş hissəyə nüfuz edən elektrik sahəsi qeyri-əsas yükdaşıyıcıların dreyf sürətini artırır. Bu səbəbdən qeyri-əsas yükdaşıyıcıların yaşama müddətinin artması p-n-n\* keçidin fotohəssaslığını artır. Qamma kvantlarla şüalandırılmış p-n keçidlərdən fərqli olaraq p-n-n\* keçidli günəş fotoçeviricilərinin ultrasəs dalğalarla dəmlənməsi zamanı müəyyən edilmişdir ki, spektrin 0,4-0,7 mkm oblastında fotoçeviricilərin fotohəssaslığının yüksəlməsi səthyanı olblasda yaranan radiasiya defektlərinin dəmlənməsi ilə bağlıdır. Bu da yaranan defektlərin təbiətinin müxtəlif olmasını göstərir. Spektral xarakteristikaların tədqiqi göstərir ki, qamma şüaların dozəsindən asılı olaraq qısa dalğa oblastında silisium əsasli fotoelementlərin fotohəssaslığı daha kəskin dəyişir. Qamma kvantlarla şüalandırılmış silisium əsasli günəş fotoçeviricilərinin ultrasəs dalğalarla dəmlənməsi zamanı müəyyən edilmişdir ki, spektrin 0,4-0,7 mkm oblastında fotoçeviricilərin fotohəssaslığının yüksəlməsi səthyanı olblasda yaranan radiasiya defektlərinin dəmlənməsi ilə bağlıdır.

## ƏSAS NƏTİCƏLƏR

- Müəyyən edilmişdir ki,  $\gamma$ - kvantlarla şüalanma zamanı p-n-n\* tipli silisium fotoelementlərində qısa qapanma cəryanının və açıq dövrə gərginliyinin azalması kontaktyanı və həcmi yüklər oblastında yaranan radiasiya defektlərinin konsentrasiyasından asılıdır və eksponensial qanuna tabe olur.
- Müəyyən edilmişdir ki,  $\gamma$ - kvantlarla şüalandırılmış p-n-n\* tipli silisium fotoelementlərinin  $T_1=150^0\text{C}$  və  $200^0\text{C}$  temperaturalarda  $t=30$  dəqiqə müddətində izoxron dəmlənməsi zamanı yaranan və aktivləşmə enerjisi  $E_v+0,20\text{ eB}$  (divakansiya kompleksi) və tutma kəsiyi  $8,110^{-16}\text{ sm}^2$  olan dərin defekt qeyri-əsas yükdaşıyıcılar üçün rekombinasiya mərkəzi rolu oynadığından yaşama müddəti azalır.
- Müəyyən edilmişdir ki,  $\gamma$ - kvantlarla  $\Phi<100$  krad dozada şüalandırılmış p-n-n\* tipli silisium fotoelementlərinin tezliyi 50 MHz və intensivliyi  $\sim 5\text{ Vt/m}^2$  olan ultrasəs dalğaları ilə  $t=240$  dəqiqə müddətində emal etdikdə radiasiya defektlərinin tam dəmlənməsi,  $\Phi>100$  krad dozada isə radiasiya defektlərinin qismən dəmlənməsi müşahidə edilir.
- $\gamma$ - kvantlarla şüalandırılmış p-n-n\* tipli silisium elementlərində radiasiya defektlərinin ultrasəs dalğaları ilə emalı zamanı müəyyən edilmişdir ki, radiasiya defektlərinin dəmlənmə sürəti  $\gamma$ - kvantların dozasından, ultrasəs dalğalarının tezliyindən və emal müddətindən asılıdır. p-n-n\* tipli Si fotoelementlərində radiasiya defektlərinin ultrasəslə emalı üçün optimal model və rejim seçilmişdir:  $F\sim 50\text{ MHz}$ ,  $W\sim 5\text{ Vt/m}^2$  və  $t=240$  dəqiqə.
- $\gamma$ - kvantlarla şüalandırılmış p-n-n\* tipli silisium elementlərində radiasiya defektlərinin ultrasəs dalğaları ilə emalı zamanı müəyyən edilmişdir ki, defekt tərəfindən udulan enerji nizamsız paylanan defektlər toplusunun parçalanmasını və nöqtəvi defektlərin diffuziya nəticəsində yenidən paylanmasını oblast əhatəsində sürətləndirir. Bu isə defektli kristallarda yükdaşıyıcıların konsentrasiyanın, yürüklüyünün və relaksasiya müddətinin dəyişməsinə idarə etməyə imkan verir.

## **DİSSERTASIYANIN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ ÜZRƏ ÇAP OLUNMUŞ ELMİ İŞLƏRİN SİYAHISI**

- 1) Tobnaghi M. D, Madatov R, Naderi D, The Effect of Temperature on Electrical Parameters of Solar Cells. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2013. V. 2, no. 12, 6404-6407.
- 2) Tobnaghi M. D, Madatov R, Sojoudi M. Influence of Illumination Intensity on Electrical Parameters of Solar Cells. Tech J Engin & App Sci, 2013, v. 3(s), p. 3854-3857.
- 3) Tobnaghi M. D, Madatov R. Influence of gamma radiation on mono-crystalline silicon solar cells. Azerbaijan Journal of Physics, Fizika. 2014, v. 20, no 1, 52-54.
- 4) Tobnaghi M. D, Madatov R. Recovery in the Photoelectric Parameters of Silicon Solar Cells Degraded Under Gamma Radiation by Ultrasonic Treatment, AMEA –nın XƏBƏRLƏRİ. 2014, v. 34, no 5, 128-132.
- 5) Tobnaghi M. D, Madatov R, Mustafayev Y, Abasov F. Influence of Gamma Radiation on Electric Properties of Silicon Solar Cells. Int. J. Pure Appl. Sci. Technol. 2014, v. 21, no. 1, p. 12-16.
- 6) Tobnaghi M. D, Madatov R, Banki T. Effect of gamma radiation on the aged mono-crystalline silicon Solar cells. Journal of Applied Science and Agriculture. 2014, v. 9, no. 3, p. 903-907.
- 7) Tobnaghi M. D, Madatov R. Recovery in the electrical parameters of the aging silicon solar cells by annealing. Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials. 2014, v. 16, no. 6, p. 764-768.
- 8) D. Mustafa, R. Madatov, B. Bahari, The effect of environmental conditions on the performance of solar cells. International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development 27&28 November 2013, Tabriz , Iran
- 9) D. Mustafa , R. Madatov, P.Farhadi, Investigation of light intensity and temperature dependency of solar cells electric parameters. 4th International Academic Conference of Young Scientists “Electric Power Engineering and Control Systems 2013, Lviv -Ukraine
- 10) D. M. Tobnaghi, A.Gholizadeh, B. Molaeifar, R.Madatov, Recovery in the electrical Parameters of Silicon Solar Cells Degraded under Gamma Radiation by Ultrasonic Treatment, 10th International Conference on

Technical and Physical Problems of Electrical Engineering, 7-8 September 2014, Baku, Azerbaijan

11) Davud Mostafa Tobnaghi and Rahim Madatov “Restores in the Parameters of Silicon Solar Cells Degraded Under Gamma Radiation by Ultrasonic Treatment, 7th Eurasian Conference, nuclear science and its application, 2014, Baku, Azerbaijan.

# THE EFFECT OF ULTRASONIC WAVS ON THE RECOVERY OF RADIATION DEFECT OF SILICON SOLAR CELL

## Abstract

In the work it is given the research results of influence of ultrasound (US) on electric and photoelectric properties of  $\gamma$ -irradiated p – n – n<sup>+</sup> – Si.

The aim of the thesis: the identification of the mechanism of influence and regularities of ultrasonic treatment on the photoelectric properties of p-n-n<sup>+</sup> Si solar cell irradiated with  $\gamma$  -ray and selection the optimum method of annealing of radiation defects. The studied samples were obtained by the thermal boron atoms bn-Si doping. In order to form the optical contacts it has been used tin.

Ultrasonic vibrations have been excited in the plate by means of ceramic (UTC - 19) converters, attached to the sample. Suppressed AC voltage frequency was  $f = 0.1 \div 50$  MHz and an amplitude of up to 20 V. As a result, Si generated acoustic oscillations, the presence of which was controlled by the other converters.

The intensity J<sub>3</sub>, introduced into the sample, was  $W \approx 0,5$  Vt/cm<sup>2</sup> at  $U_{Us} \approx 10$  V and  $f = 50$  MHz.

All ultrasonic treatments and subsequent changes were carried out at room temperature.

It has been studied the load-volt-ampere characteristics of the samples before and after irradiation with  $\gamma$ -rays at doses up to 2000 krad. Experimental results show that after gamma radiation the short circuit current lost to 22% and after ultrasonic treatment this parameter 15% recovered. The obtained results show the performance of ultrasonic treatment compared with thermal annealing for restores of degraded silicon solar cells. The obtained experimental results can be explained by the model of the bistable acoustic-active recombination center.

# ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС ОТЖИГА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В СОЛНЕЧНОМ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НА ОСНОВЕ Si

## Резюме

В данной работе представлены результаты исследования влияния ультразвука (УЗ) на электрические и фотоэлектрические свойства  $p-n-n^+-Si$  облучённых  $\gamma$ -квантами.

Цель диссертационной работы: выявление механизма воздействия и закономерности ультразвуковой обработки на фотоэлектрические свойства солнечных элементов типа  $p-n-n^+-Si$ , облучённых  $\gamma$ -квантами и выбор оптимального режима отжига радиационных дефектов.

Исследуемые образцы были получены методом термического легирования атомами бора в  $n-Si$ . Для создания омических контактов использовали олово.

Ультразвуковые колебания в пластине возбуждались с помощью керамических (УТС - 19) преобразователей, прикреплённых на образец. Подаваемое переменное напряжение имело частоту  $f = 0,1-50$  МГц и амплитуду до 20 В. В результате этого в Si генерировались акустические колебания, наличие которых контролировались другими преобразователями.

Интенсивность ультразвука, вводимого в образец составляла  $W \approx 0,5$  Вт/см<sup>2</sup> при  $U_{УЗ} \approx 10$  В и  $f = 50$  МГц. Все ультразвуковые обработки и последующие измерения проводились при комнатной температуре.

Исследовались нагрузочные вольтамперные характеристики образцов до и после облучения  $\gamma$ -квантами дозами до 2000 крад. Показано, что наиболее чувствительный параметр ВАХ, определяющий к.п.д. преобразователя ток короткого замыкания при облучении изменяется максимум на 22%, с последующим ростом на 15% при УЗ-обработке. Представлена дозовая зависимость УЗ - обработки облучённых преобразователей. На примере высоких доз показано преимущество ультразвуковой обработки над термическим отжигом. Полученные экспериментальные результаты можно объяснить с помощью модели бистабильного акусто-активного рекомбинационного центра.



AMEA-nın mətbəəsində çap olunub  
Tiraj-100

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА  
ИНСТИТУТ РАДИАЦИОННЫХ ПРОБЛЕМ**

*На правах рукописи*

**ДАВОУД МУСТАФА ТОБНАГИ СОДЕЙФ ОГЛЫ**

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА  
ПРОЦЕСС ОТЖИГА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В  
СОЛНЕЧНОМ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НА ОСНОВЕ  
Si**

**2225.01 – Радиационное материаловедение**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора философии по физике

**Б А К У - 2014**