

## SELVARI FOTODİODLARIN RADİASIYA DAVAMLILIĞININ ÖYRƏNİLMƏSİ

F.İ. ƏHMƏDOV<sup>1, 2, 3</sup><sup>1</sup>Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası, Strateji Elmi Tədqiqatlar Mərkəzi, Bakı, 1001, İstiqlaliyyət, 30,<sup>2</sup>Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası, Radiasiya Problemləri İnstitutu, Bakı, 1143, B.Vahabzadə 9,<sup>3</sup>NRVTN-Milli <sup>3</sup>Nüvə Tədqiqatlar Mərkəzi, Bakı, 1073, İnşaatçılar 4e-mail: [farid-akhmedov@yandex.ru](mailto:farid-akhmedov@yandex.ru)

Təqdim edilən işdə Co-60 mənbəsindən istifadə edilərək 250kQr radiasiya dozasında MAPD kalobarasıya çərçivəsində hazırlanmış mikropikselli selvari fotodiodların xassələri tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, 250 kQr şüalanma dozasında selvari fotodiodların işlənmə gərginliyi və tam tutumları dəyişmiş, lakin fotodiodlarının qaranlıq cərəyanı ilkin hala nəzərən 15 dəfə artmışdır. Selvari fotodiodların qaranlıq cərəyanının artmasına səbəb radiasiya nəticəsində həcmdə yaranan yeni generasiya mərkəzləri olmuşdur. MAPD kalobarasıya tərəfindən təqdim edilmiş selvari fotodiodların radiasiya davamlığı analoglarına nisbətən dəfələrlə yüksək olmuşdur.

**Açar sözlər:** Mikropikselli Selvari Fotodiod; MAPD; qamma; doza; MPPC; FEG.

**PACS:** 07.77-n; 07.77.-Ka; 29.40Wk; 85.30De; 85.60Dw

## GİRİŞ.

Heyger rejimli mikropikselli selvari fotodiodlar (MSFD) sahəsində əldə edilən uğurlar bu tip qeydedicilərin normal rejimdə işləyən selvari fotodiodlar və FEG-lərlə müqayisədə çox geniş oblastda tətbiqinə imkan vermişdir: yüksək enerjilər fizikasında (CMS, ATLAS, ALICE, NICA), astronomiyada (MAGIC), kosmik tədqiqatlarda, tibbdə (PET, gamma camera), spektroskopiyaya və dozimetriya sahəsində [1-6]. Aparılan bu təcrübələrin əksəriyyətində MSFD fotodiodlar yüksək radiasiya şüalanma fonunda işləyirlər [7]. Belə olduğu halda radiasiyanın təsiri ilə MSFD fotodiodlarının xassələrində baş verəcək dəyişmələr qaçılmazdır. MSFD fotodiodların xassələrinə protonların, alfa zərəciklərinin və neytronların təsiri artıq bir çox tədqiqatçılar tərəfindən geniş öyrənilmişdir [7-10]. MSFD fotodiodlar son illərdə qamma spektroskopiyaya və dozimetriya sahəsində geniş tətbiq olunma imkanları əldə etmişdirlər [11]. İstifadə edilən bu tip qamma spektrometrlər və dozimetrlər tam istismar müddətində maksimal olaraq qamma şüaları ilə 10 kQr dozaya məruz qalır. Artıq bir çox tədqiqatçılar müxtəlif firmaların MSFD diodlarına qamma şüaların təsirini tədqiq etmişdir [12,13]. [12] işində Co-60 mənbəsindən istifadə edilərək MPPC diodları 240 Qr doza ilə şüalandırılmış və bu zaman qaranlıq cərəyanı təqribən 2 dəfə və diodun küyü isə 1.7 dəfə artmışdır. [13] işində MPPC fotodiodlar Co-60 mənbəsindən istifadə edilərək 9.4 kQr dozaya qədər şüalanmış və bu zaman diodun qaranlıq cərəyanı təqribən 15 dəfə artmışdır. Başqa sözlə aparılan tədqiqatlardan göründüyü kimi, yüksək radiasiya fonunda MSFD fotodiodların fiziki xassələrinə qamma şüaların təsiri hələ də geniş öyrənilməmişdir.

Təqdim edilən işdə Co-60 mənbəsindən istifadə edilərək yüksək radiasiya dozasında MAPD kalobarasıya çərçivəsində hazırlanmış MSFD-3NK diodlarının xassələri tədqiq edilmişdir.

## TƏCRÜBƏ VƏ NƏTİCƏLƏRİN MÜZAKİRƏSİ.

Qamma şüalarla şüalandırma üçün 4 ədəd MSFD-3NK diodundan istifadə edilmişdir. Hər 4 dio-

dun qaranlıq cərəyanları və işləmə gərginliyi bir-birinə yaxın seçilmişdir. Şüalanmış diodun xassələri ölçülərkən hər dəfə etalon dioddan istifadə edilmişdir. Qamma şüa mənbəsi olaraq AMEA-nın Radiasiya Problemləri institutunun nəzdində olan yüksək aktivlikli Co-60 mənbəsindən istifadə edilmişdir. Co-60 mənbəsinin aktivliyi ~17394.07 GBk olmuşdur. Diodlar Co-60 mənbəsindən 20 sm məsafədə suyun içində şüalandırılmışdır. Şüalanma zamanı diodlara gərginlik tətbiq edilməmişdir. İstifadə edilən diodların eyni bir gücləndirmə əmsalında diodlara tətbiq edilən gərginliyin fərqi 1% az olmuşdur. MSFD-3NK diodlarının şüalanması 3 mərhələdə yerinə yetirilmişdir: 20 kQr, 100 kQr və 250 kQr. Şüalanmanın ilk mərhələsində (20 kQr) hər üç diod şüalandıqdan sonra onun qaranlıq cərəyanı ölçülmüşdür. Şüalanmanın ikinci mərhələsində (100 kQr) diodlardan yalnız ikisi şüalandırılmış və onların qaranlıq cərəyanı dəyişməsi ölçülmüşdür. Şüalanmanın sonuncu mərhələsində (250 kQr) yalnız bir diod şüalandırılmış və onun Volt-Amper xarakteristikasının (VAX) dəyişməsi müəyyən edilmişdir. Təcrübənin bu formada aparılması mümkün olacaq xətalərin azaldılmasının təmin edilməsi üçün edilmişdir. Ölçmələr şüalandıqdan 1-2 saat sonra 27.8C° temperaturda aparılmışdır. Diodların şüalanma müddəti 35 gün olmuşdur. Ölçmələr zamanı temperatur dəyişməsi 5%-dan çox olmamışdır. Diodların VAX-nın ölçülməsi zamanı şəkil 1-də göstərilən dövrədən istifadə edilmişdir. Dövrədəki R1 müqavimətinə əlavə gərginlik düşməməsi üçün R1=4.7 kOm seçilmişdir.

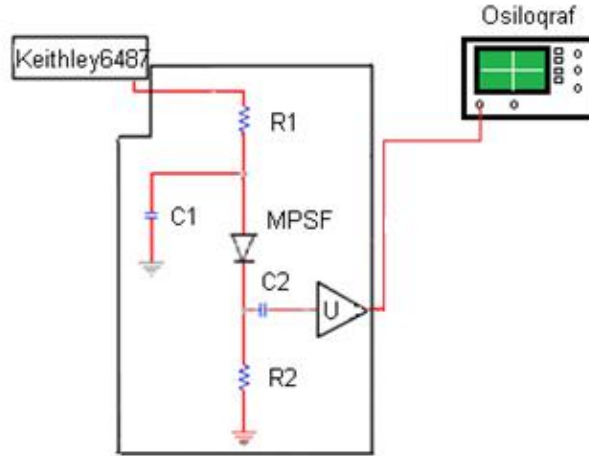
Şəkil 2-də etalon, 20 kQr, 100 kQr və 250 kQr doza ilə şüalandırılmış MSFD-3NK diodlarının VAX-nın tam dəyişməsi göstərilmişdir. Göründüyü kimi 20kQr dozadan MSFD-3NK diodun 90.5V gərginlikdə qaranlıq cərəyan 920 nA-dən artaraq 1912 nA olmuşdur və qaranlıq cərəyan 2.07 dəfə artmışdır. Şüalanmanın bu dozasında diodun üzərindəki qoruyucu təbəqə sayılan epoksidin rəngi tünd qaralmışdır və bu səbəbdən diodun foto xassələrinin tədqiq edilməsi mümkün olmamışdır. Bundan başqa 20kQr doza ilə şüalandırılmış diodun otaq temperaturunda zaman asılı olaraq VAX-nın dəyişməsidə tədqiq edilmişdir. Bu zaman VAX-ın 7 gün müddətində dəyişmədiyi müəyyən edilmişdir. Şüalanma dozasının 100 kQr qi-

mətində isə diodların qaranlıq cərəyanı 920 nA-dən 6152 nA-ə kimi artmışdır. Bununla yanaşı, bu şüalanma dozəsindən sonrada diodun epoksid təbəqəsi daha tünd rəngdə olmuşdur. Həmçinin, 250 kQr şüalanma dozəsindən sonrada diodların qaranlıq cərəyanlar 13712 nA olmuşdur. Qaranlıq cərəyanın ümumi dəyişməsi 90.5V gərginlikdə təqribən 15 dəfə olmuşdur. Hər üç şüalanma mərhələsində otaq temperaturunda 7 gün dəmləmə müddətində VAX-nın dəyiməsində heç bir dəyişiklik müşahidə edilməmişdir. Şəkil 3-də

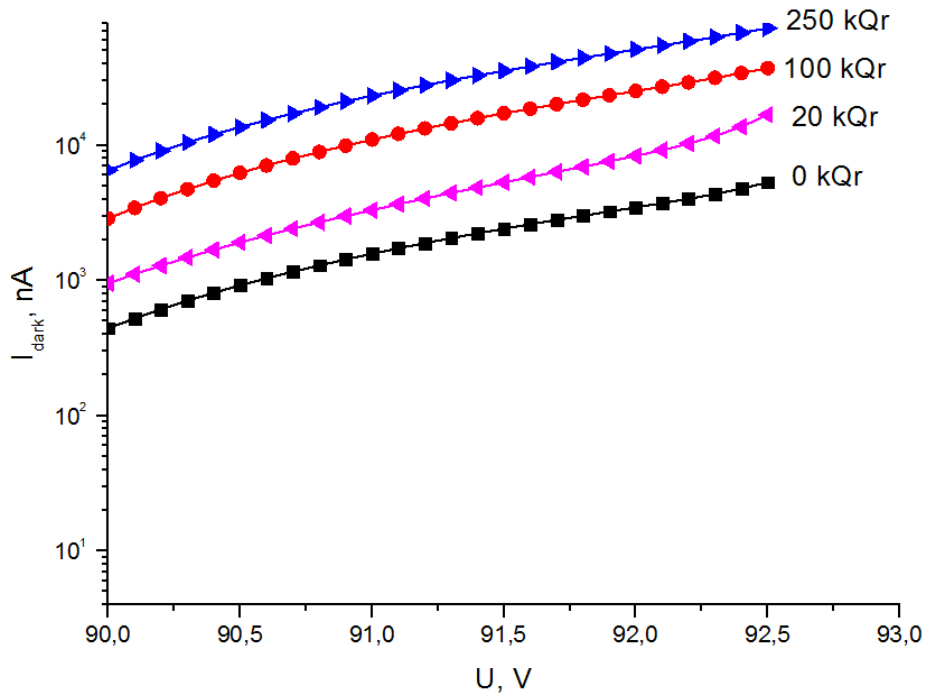
90.5V gərginlikdə MSFD-3NK diodunun qaranlıq cərəyanının qamma şüalanma dozəsindən asılılığı qurulmuşdur. Göründüyü kimi, qaranlıq cərəyan şüalanma dozəsindən asılı olaraq xətti dəyişir və belə ifadə edilir:

$$I_{da} = 938.7 + 51.6 * D \quad (1)$$

burada  $I_d$ - diodun (90.5V) qaranlıq cərəyanı və  $D$ - şüalanma dozəsidir (kQr).

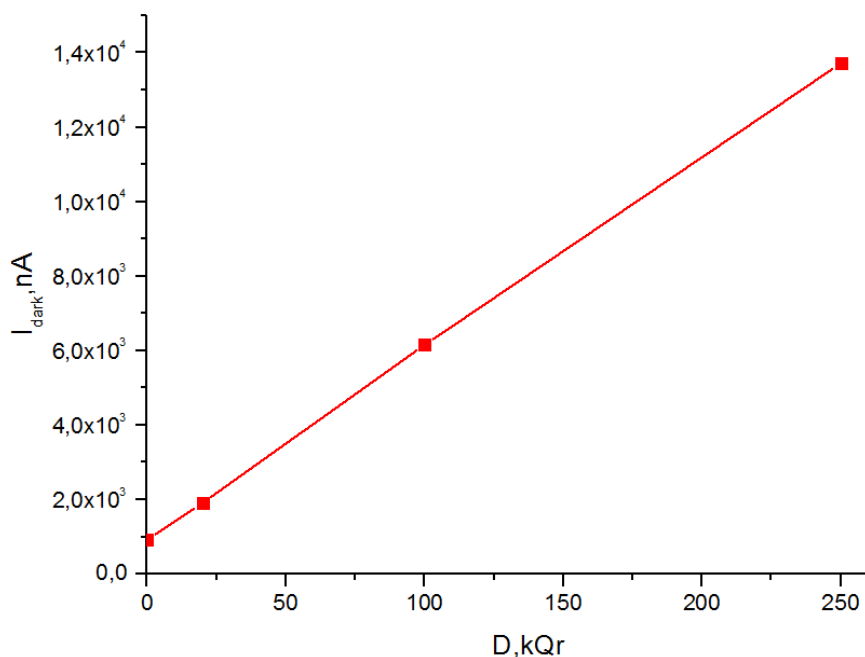


Şəkil 1. MSFD diodların parametrlərini ölçmək üçün istifadə edilən dövrə.

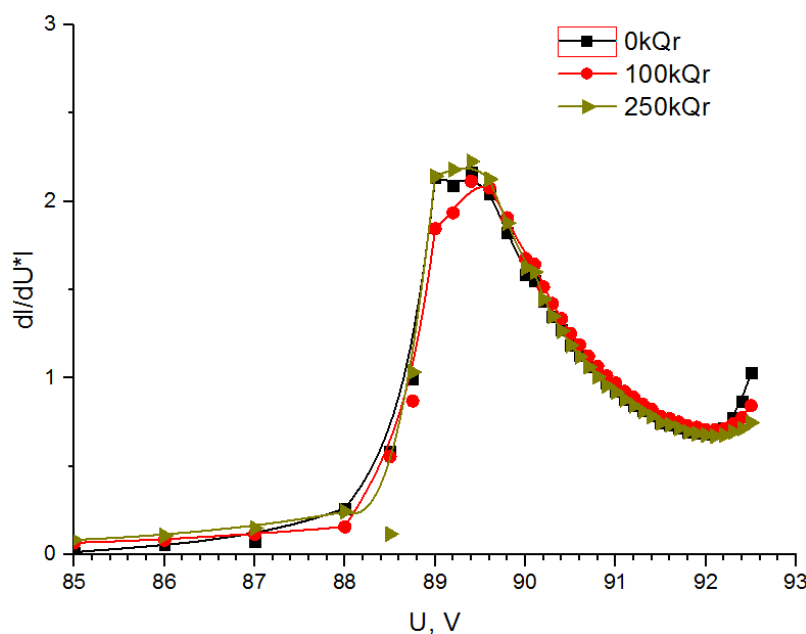


Şəkil 2. Mikro-pikselli selvari fotodiodun qaranlıq cərəyanının müxtəlif dozalarda gərginlikdən asılılığı.

## SELVARI FOTODİODLARIN RADİASİYA DAVAMLIĞININ ÖYRƏNİLMƏSİ



Şəkil 3. Mikro-pikselselvari fotodiodun qaranlıq cərəyanının şüalanma dozəsindən asılılığı.



Şəkil 4. Mikro-pikselli selvari fotodiodun diferensial qaranlıq cərəyanının gərginliyə nisbətinin müxtəlif dozalarda gərginlikdən asılılığı.

Şəkil 4-də qamma şüaları ilə şüalandırılmış diodların diferensial cərəyanın gərginliyə  $dI/(dU \cdot I)$  nisbətininin gərginlikdən asılılığı qurulmuşdur. Ölçülən kəmiyyətlərin hər ikisində Keithley 6487 pikoampermetrlə təyin edilmişdir. Diferensial asılılıqda qaranlıq cərəyanın tədricən kəskin dəyişdiyi gərginlik oblastına baxılmışdır. MSFD-3NK diodlarında bu gərginlik oblastı 88V gərginlikdən başlayaraq daha yuxarı gərginliyə kimi davam edir. Gərginliyin 88-89V intervalında qaranlıq cərəyanın artma sürəti kəskinləşir və artır. Bu hadisə artıq  $p-n$  keçiddə selvari prosesin baş verməsi ilə bağlı olmuşdur. Gərginliyin sonrakı 89-

89,6V intervalındakı qiyməti əksər hallarda deşilmə gərginliyinə uyğun gəlir və deşilmə gərginliyi hər üç diod üçün 89,3V uyğun gəlmişdir. Artıq gərginliyin sonrakı qiymətlərində selvari proses söndürücü müqavimət vasitəsi ilə söndürülür və qaranlıq cərəyanın kəskin dəyişməsi önlənir. Gərginliyin 91,6-92,3V intervalındakı differensial cərəyanın dəyişməsi sürətlə azalmış və doyma halına yaxınlaşmışdır. Bu hal ən optimal hal hesab edilir. Bu halda diodun gücləndirmə əmsalı, FQE-si və enerjiyə görə ayırd etməsi optimal qiymət alır. Bu səbəbdəndəbu oblast işləmə gərginliyi adlandırılır. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində dife-

rensial cərəyanın artması kəskinləşir. Belə dəyişmə isə diodun strukturunda idarə olunmazdeşilmələrin əmələ gəlməsi ilə bağlıdır. Beləliklə, şüalanma dozasının 250kQr qiymətindən sonra diodundeşilmə və işləmə gərginliyində ciddi dəyişmələrə müşahidə edilməmişdir (şəkil 4).

Göründüyü kimi, şüalanmış diodun tam qaranlıq cərəyanının artması fəza yüklər oblastdakı generasiya cərəyanının artmasından asılıdır. Qaranlıq cərəyanın artmasına əsas səbəb epitaksial təbəqələrdə yeni generasiya mərkəzlərinin yaranmasıdır. Bu generasiya mərkəzlərinin konsentrasiyası şüalanma dozası artdıqca, xətti olaraq artır. Məlumdur ki, selvari fotodiodun tam qaranlıq cərəyanı belə ifadə olunur:

$$I = I_{s\ th} + M \times \dot{I}_{gen},$$

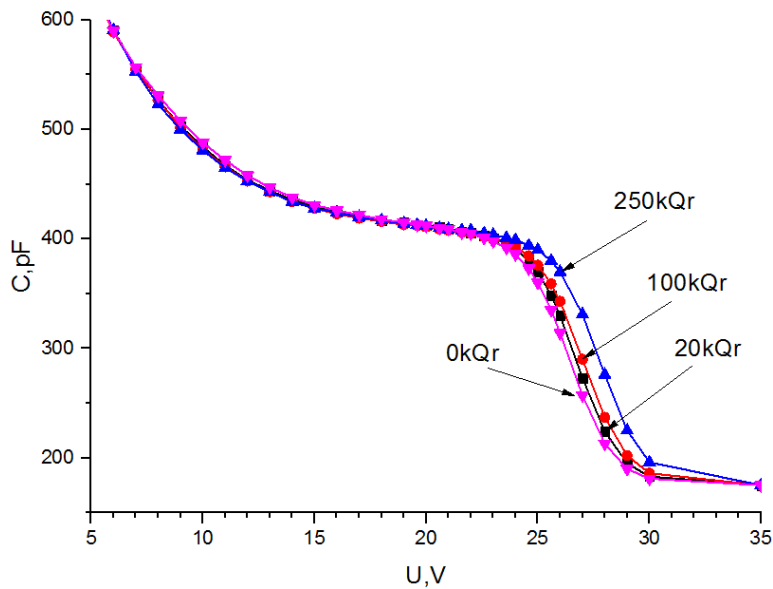
burada,  $J_{sath}$  – selvari güclənmədə iştirak etməyən səthi qaranlıq cərəyan,  $J_{gen}$  – diodun aktiv layında yaranan və güclənmədə iştirak edən qaranlıq cərəyan,  $M$  – selvari prosesin gücləndirmə əmsəlidir. Məhz bu səbəbdən də radiasiya hesabına yaranan generasiya cərəyanı artdıqca, MSFD diodunda qaranlıq cərəyanı xətti olaraq artmışdır. Diodun qaranlıq cərəyanının 15 dəfə artmasına baxmayaraq MSFD-3NK diodları 250kQr dozada öz işlək parametrlərini saxlamışdır.

Şəkil 5-də qamma şüaları ilə şüalanmış diodların tərs istiqamətdə Volt-Farad xarakteristikası (VFX) göstərilmişdir. Bunun üçün E7-20 qurğusundan istifadə edilmişdir. Sinusoidal siqnal olaraq amplitudu 40mV olan və tezliyi 100Hz-1MHz intervalında dəyişən siqnal verilməmişdir. MSFD-3NK diodunun tutumu aşağı gərginliklərdə yüksək olmuşdur. Daha sonra gərginlik artdıqca, həcmi yüklər oblastının eni

artmış və nəticədə diodun tutumu kəskin azalmışdır. Gərginliyin 30-35 V qiymətlərində diodun aktiv həcmi artıq tam həcmi yüklərlə əhatə edilmiş və tutum qiyməti doyma halına yaxınlaşmışdır. Qamma şüalanma dozasının 100kQr və 250kQr qiymətlərində diodun tam tutumunda heç bir dəyişiklik müşahidə edilməmişdir. Şüalanma dozasından asılı olaraq dəyişmə yalnız VFX-nin 24V-30V gərginlik intervalında hiss edilmişdir. Məlumdur ki, ikinci epitaksial layın həcmi yüklərlə əhatə edilməsi, məhz 20V-dan yuxarı gərginlikdə başlayır və təqribən 30V gərginlikdə tamamlanır. Beləliklə, bu dəyişmə birbaşa olaraq ikinci epitaksial layda baş verən proseslə bağlı olduğunu göstərir. Tətbiq edilən gərginlik intervalının 27V-28V qiymətlərində tutumun dəyişməsi dozadan asılı olaraq maksimum 6-30% arasında dəyişmişdir. Şüalanma dozası artdıqca, 27V gərginlikdə tutumun artdığı məlum olmuşdur. Şəkil 6-da 27V gərginlikdə tutumun qiymətinin gərginlikdən asılılıq əyrisi qurulmuşdur. Asılılıq əyrisindən göründüyü kimi, diodun tutumu xətti qanunla dəyişir və belə ifadə edilir:

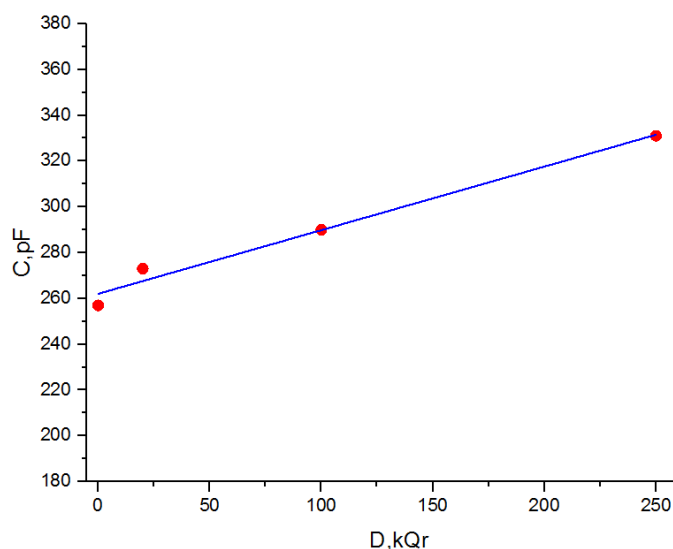
$$C(pF) = 262,1 + 0,3 * D(kQr) \quad (2)$$

Burada,  $C(pF)$  –MSFD fotodiodun tutumunun 27V gərginlikdəki qiymətidir və pF ifadə edilə bilər,  $D$ –şüalanma dozasıdır və vahidi kQr ifadə edilə bilər. MSFD-3NK fotodiodunun 27V gərginlikdə tutumunun dəyişməsinin izah edilməsi üçün tutumun tezlikdən və dozadan asılılığının daha geniş tədqiq edilməsinə ehtiyac duyulur. Lakin yuxarı gərginliklərdə (35V qamma şüası ilə 250kQr şüalanmadan sonra MSFD-3NK diodunun əsas tutumunda (180 pF) nəzərə çarpan dəyişmə müşahidə edilməmişdir.

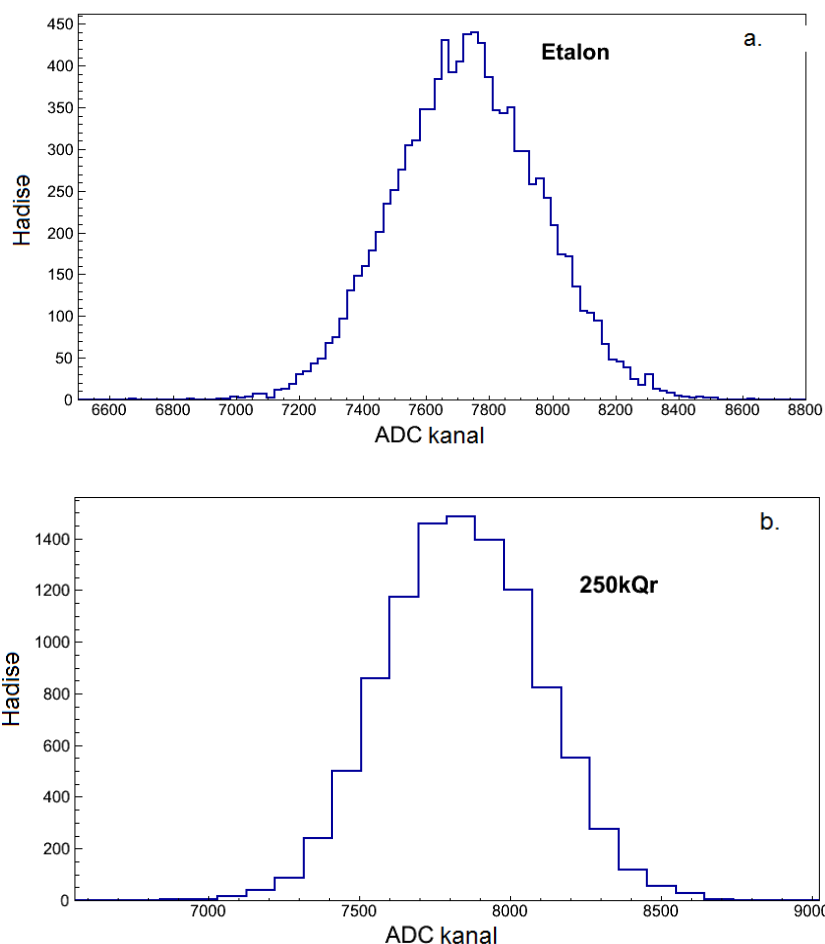


Şəkil 5. Qamma şüaları ilə şüalanmış MSFD-3NK diodların tərs istiqamətdə volt farad xarakteristikası (VFX).

## SELVARI FOTODİODLARIN RADİASİYA DAVAMLIĞININ ÖYRƏNİLMƏSİ



Şəkil 6. Tətbiq edilən gərginliyin 27V qiymətində MSFD-3NK diodunun tutumunun şüalanma dozasından asılılığı.



Şəkil 7. Etalon (a) və şüalanmış (b) fotodiodla qeyd edilən fotosiqnalın amplitud paylanması.

Şəkil 7-də etalon və 250 kQr dozaya qədər şüalanmış MSFD-3NK fotodiodlarının 850 nm dalğa uzunluqlu işığa həssaslığı göstərilmişdir. Bunun üçün Tektroniks generatordan davam etmə müddəti 100ns, tezliyi 1 kHz və amplitudu 1,1 V olan mənfəi siqnallar işıqlandırıcı fotodioda verilmişdir. Etalon fotodiodda fotopikə uyğun gələn amplituda görə ayırdetmə

mə 6,9 %, şüalanma dozasının 250 kQr qiymətində fotopikə uyğun gələn amplituda görə ayırdetmə 7,5 % alınmışdır. Məlum olmuşdur ki etalon fotodiodla müqayisədə şüalanmış fotodiodla qeydə edilən siqnalın amplituda görə ayırdetməsi 8,7 % artaraq pisləşmişdir. Lakin, bu dəyişməyə baxmayaraq MSFD-3NK fotodiodları öz işlək parametrlərini saxlamışdır.

## NƏTİCƏ.

Müəyyən edilmişdir ki, Co-60 mənbəsi ilə 250kQr dozaya qədər şüalanmış MSFD-3NK fotodi-odlarının işlənmə gərginliyi və tam tutumu dozadan asılı olmur. Əsas dəyişmə fotodi-odların qaranlıq cərəyanında müşahidə edilmişdir və ilkin hala nəzərən 15 dəfə artmışdır. MSFD-3NK fotodi-odlarının qaranlıq cərəyanı dozadan asılı olaraq xətti qanunla dəyişdiyi

aşqar edilmişdir. MSFD-3NK fotodi-odlarının qaranlıq cərəyanının artmasına səbəb radiasiya nəticəsində həcm-də yaranan yeni generasiya mərkəzləri olmuşdur. MAPD kalobarasiya tərəfindən təqdim edilmiş MSFD-3NK fotodi-odların radiasiya davamlığı analoqlarına nisbətən eyni bir dozada dəfələrlə yüksək olmuşdur.

Bu iş “SOCAR-ın “Elm Fondu”nundəstəyi ilə yerinə yetirilmişdir.

- |   |   |
|---|---|
| <p>[1] Z. Sadygov, O. Olshevski, I. Chirikov et al. Nucl. Instrum. Meth. A, 2006, V. 567, p. 70-73.</p> <p>[2] D. Renker. Nucl. Instrum. Meth. A, 2002, v. 486, p. 164-169.</p> <p>[3] F. Ahmadov, G. Ahmadov, E. Guliyev, S. Khorev, A. Sadigov, Z. Sadygov, S. Suleymanov. Journ. of Instrumentation, v.10, 2015, p. 1-7.</p> <p>[4] D. Renker. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 567, 2006, p. 48-56.</p> <p>[5] A. Ivashkin, F. Akhmadov, R. Asfandiyarov, A. Bravar, A. Blondel, W. Dominik, Z. Fodor, M. Gazdzicki, M. Golubeva, F. Guber, A. Hasler, A. Korzenev, S. Kuleshov, A. Kurepin. Hadron calorimeter with MAPD readout in the NA61/SHINE experiment, arXiv preprint arxiv: 1205.4864.</p> <p>[6] Z. Sadygov, F. Ahmadov, X. Abdullaev et al. Development of scintillation detectors based on micro-pixels avalanche photodiodes, Proceedings of Science, 2012, (PhotoDet 2012) 37.</p> <p>[7] V. Kushpil, V. Mikhaylov, V. Ladygin et. all. Papan Letters, 2016, v. 13, n. 1(199), pp.190-198.</p> | <p>[8] F.I. Ahmadov, R.S. Madatov, Z.Y. Sadygov. AMEA-nın Xəbərləri, Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya Bakı-2011, v. 31, n.5, s.14-17</p> <p>[9] Z. Y. Sadygov, F. I. Ahmadov, N.V. Anfimov, Z.V. Krumshstein, A.G. Molokanov, A.A. Nozdrin, A.G. Olshevski. Fizika Jurnalı, 2012, Cild 18, №2, s 18-19.</p> <p>[10] X.İ. Abdullayev, F.İ. Əhmədov, R.S. Mədətov, R.M. Muxtarov, Z.Y. Sadıqov. Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələr, Cild 14, №1, 2012, s. 12-14.</p> <p>[11] F Ahmadov, G Ahmadov, E Guliyev, R. Madatov, A Sadigov, Z Sadygov, S Suleymanov. New gamma detector modules based on micropixel avalanche photodiode, Journal of Instrumentation, 2017, v.12, n. 1, p. C01003</p> <p>[12] T. Matsubara, H. Tanaka, K. Nitta, M. Kuze. Proceeding of Science, 2007, PoS (PD07) 032.</p> <p>[13] Roberto Pagano, Salvatore Antonino Lombardo, Felix Palumbo, Sebania Libertino. Nucl. Instrum. Meth. 767, 2014, pp. 347-352.</p> |
|---|---|

F.I. Ahmadov

## INVESTIGATION OF RESISTANCE OF AVALANCHE PHOTODIODES

The paper presents the results of the investigation of the micropixel avalanche photodiodes parameters obtained in the framework of the MAPD collaboration, after irradiating them with a radioactive source of Co-60 gamma radiation with a dose of 250 kGy. It was shown that when the photodiodes were irradiated with a 250 kGy dose, the device parameters did not change, but the dark current increased in 15 times. The reason for the increase of the dark current was the formation of generation centers throughout the photodiode bulk. It was revealed that the presented MAPD-3 NK avalanche photodiode from the MAPD collaboration has a radiation resistance in several times higher in comparison with analogues.

Ф.И. Ахмедов

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ

В работе представлены результаты исследования параметров микропиксельных лавинных фотодиодов, полученные в рамках MAPD коллаборации, после облучения их радиоактивным источником гамма излучения Co-60, дозой 250кГр. Было показано, что при облучении лавинных фотодиодов дозой 250кГр, параметры прибора не изменились, однако темновой ток увеличился в 15 раз. Причиной увеличения темного тока являлось образование центров генерации электронов по всему объему фотодиода. Было выявлено, что представленный лавинный фотодиод MAPD-3 NK от коллаборации MAPD, имеет радиационную стойкость в несколько раз выше по сравнению с аналогами.

Qəbul olunma tarixi: 05.07.2019