

YENİ MAPD-3NM SİLİSIUM ƏSASLI FOTOELEKTRON GÜCLƏNDİRİCİLƏRİN PARAMETRLƏRİNİN TƏDQIQI

F.İ. ƏHMƏDOV^{1,3}, Q.S. ƏHMƏDOV^{1,2,3}, Z.Y. SADIQOV^{1,2,3}, A.Z. SADIQOV^{1,2},
A.H. MƏMMƏDLİ¹, N.V. SADIQOVA¹, M. HOLİK⁴, E.YİLMAZ⁵

¹Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Radiasiya Problemləri İnstitutu,

Bakı, Azərbaycan, AZ-1143, B. Vahabzadə küç, 9.

²Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutu, Dubna, Rusiya

³NRITN - Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi, Bakı, Azərbaycan

⁴CTU- Eksperimental və Tətbiqi Fizika İnstitutu, Praqa, Çexiya

⁵İBU Nüvə Radiasiya Detektorları Tətbiq və Araşdırma Mərkəzi, Bolu, Türkiyə

E-mail: farid-akhmedov@yandex.ru

Təqdim olunan işdə Zecotek şirkətinin istehsal etdiyi dərin piksellə MSFD-3NK və MSFD-3M fotodiodlarının parametrləri tədqiq edilmişdir. Təcrübi metodlar ilə fotodiodların volt-ampere, volt-farad xarakteristikaları, gücləndirmə əmsalı və dəşilmə gərginliyi tədqiq edilmişdir.

GİRİŞ

Mikropikselli Selvari Fotodiodlar (MSFD) fotoelektron gücləndiricilərlə müqayisədə özünün geniş tətbiq imkanlarına malikdirlər [1-3]. Artıq bir çox tədqiqatçılar Hamamatsu (Yaponiya), KETEK (Almaniya), FBK (İtaliya), -Zecotek (Kanada, Singapur) və SensL (İrlandiya) şirkətlərin müxtəlif MSFD tipli fotoqəbuledicilərdən istifadə edərək ionlaşdırıcı radiasiya detektorlarının yaradılması və onların tətbiq imkanlarını tədqiq edirlər [4-10, 11]. MSFD-lərin bir çox təcrübələrdə tətbiq edilməsi üçün bir sıra şərtlər tələb edilir: aşağı işləmə gərginliyi, yüksək fotoqeydetmə effektivliyi (FQE), maqnit sahəsinə həssas olmaması, kompakt olması, yüksək piksel sıxlığı, dəşilmə gərginliyinin temperatur sabitinin kiçik olması, radiasiya davamlı olması və s. [1-2, 8, 9].

Hazırda əsas olaraq mikropikselli selvari fotodiodların 2 növü mövcuddur: səthi və dərin piksellə [1, 3]. Səthi piksellə selvari fotodiodlarda piksellər səthdə yerləşir və hər bir piksel söndürücü müqavimət vasitəsi ilə katoda birləşir. MSFD-lərdə piksellər bir-birinə paralel birləşir və hər piksel izləyici kanalla ayrılır. Beləliklə, səthi piksellə fotodiodlarda həssas sahənin müəyyən hissəsi söndürücü müqavimətlər, izləyici kanallar və ana xətlər vasitəsi ilə tutulmuş olur [1, 3]. Bu işə fotodiodun həndəsi faktorunun və eyni zamanda fotoqeydetmə effektivliyinin (FQE)-nin azalmasına səbəb olur. Bu tip fotodiodlarda piksel sıxlığı artdıqca, həndəsi faktor və fotoqeydetmə effektivliyi (FQE) kəskin azalır. Buna misal olaraq Hamamatsu şirkətinin istehsal etdiyi MPPC-050 -10P-ni göstərmək olar. Bu fotodiodların piksel sıxlığı 400-10000 piksel/sm² və FQE-si 40%-10% ətrafında dəyişmişdir [12, 13]. Bu çatışmazlıqlar pikselləri səthdə yerləşən fotodiodların yüksək enerjili zərrəciklərin qeyd edilməsində və spektroskopiyada istifadəni məhdudlaşdırır [2].

Səthi piksellə MSFD-dən fərqli olaraq dərin piksellə fotodiodlarda hər bir piksel epitaksial təbəqənin daxilində yerləşir. Bu fotodiodlarda hər bir piksel birinci epitaksial təbəqə ilə altlığa birləşir və söndürücü müqavimət rolunu piksellə epitaksial təbəqə arasında yaranan potensial çəpər oynayır [2, 3, 14].

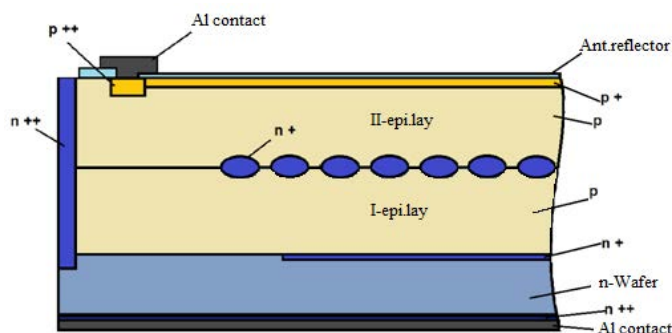
Pikselləri dərinlikdə yerləşən MSFD tipli fotoqəbuledicilər ilk dəfə Zecotek Ph. İnc şirkəti tərəfindən istehsal edilmişdir [1, 14]. Dərin piksellə selvari fotodiodlar 2009-cü illərdən başlayaraq geniş tədqiq edilməyə başlanılmışdır [15]. Tətbiq sahəsindən asılı olaraq, ilk dəfə piksel sıxlığı 40000 piksel/mm² olan MAPD-3B diodları istehsal edilmişdir. MAPD-3B fotodiodlar yüksək enerjilər fizikasında tətbiq olunması üçün nəzərdə tutulmuşdur. Bu quruluşda pikselin ölçüsü 2 mkm və addım 5 mkm seçilmişdir. MAPD-3B fotodiodları piksel sıxlığına görə yüksək enerjilər sahəsində aparılan təcrübələr üçün optimal sayılsa da, onun bir sıra çatışmayan cəhətləri mövcud idi [16]. Məs., gücləndirmə əmsalının (10⁴) və FQE-nin (10 %) aşağı olması. Bu çətinliyin aradan qaldırılması üçün daha sonra MAPD-3A fotodiodları hazırlandı. Bu quruluşda pikselin ölçüsü 3 mkm və addım 5 mkm idi. Bu quruluşda piksel sıxlığı 15000piksel/mm² alınmışdır. Pikselin sahəsi artdığından ($C_p \sim S_p$) MAPD-3A fotodiodların gücləndirməsi $\sim 3 \cdot 10^4$ və FQE-si 15 % yaxınlaşmışdır [16]. Lakin, tibbdə və yüksək enerjilər fizikasında aparılan bəzi təcrübələr üçün FQE-nin 20% yuxarı olması tələb edilirdi. MAPD fotodiodların gücləndirmə əmsalının və FQE-sini artırmaq üçün piksellərin diametri artırılaraq 5mkm və addım 7 mkm seçilmişdi. Bu quruluşda hazırlanan fotodiodlar MAPD-3N adlandırılmışdır [17]. MAPD-3N fotodiodlarının gücləndirilməsi $\sim 6 \cdot 10^4$ və FQE-si $\sim 25\%$ yaxınlaşmışdır. MAPD-3N fotodiodlarının piksel sıxlığı 15000 piksel/mm² olmuşdur. Daha sonra MAPD fotodiodlarının parametrlərini yaxşılaşdırmaq üçün MAPD-3NK hazırlanmışdır. MAPD-3NK fotodiodunda piksellərin diametri 7 mkm və addım 10 mkm seçilmişdir. Belə bir quruluş MAPD-3NK fotodiodlarının piksel sıxlığının 10000 piksel/mm² olmasına imkan vermişdir [2]. MAPD-3NK fotodiodlarının gücləndirmə əmsalı $6 \cdot 10^4$ və FQE-si 30% ətrafında idi. Qaranlıq cərəyanın yüksək olması epitaksial təbəqənin, yayferin keyfiyyətindən asılıdır və bu çətinliyin aradan qaldırılması onların keyfiyyətini artırmaqla mümkündür [18]. Sadalanan digər çatışmazlıqların aradan qaldırılması

üçün, epitaksial təbəqələrin qalınlığının azaldılması və aşqar konsentrasiyanın artırılması təklif edilmişdir. MSFD-3NK fotodiodlarda olan çatışmazlığı aradan qaldırmaq üçün 2019-cu ildə MAPD kolaborasiya tərəfindən yeni MSFD-3NM fotodiodları işlənilib hazırlanmışdır. Təqdim edilən iş MSFD-3NK və yeni hazırlanmış MSFD-3NM fotodiodlarının parametrlərinin müqayisəli şəkildə tədqiq edilməsinə həsr edilmişdir.

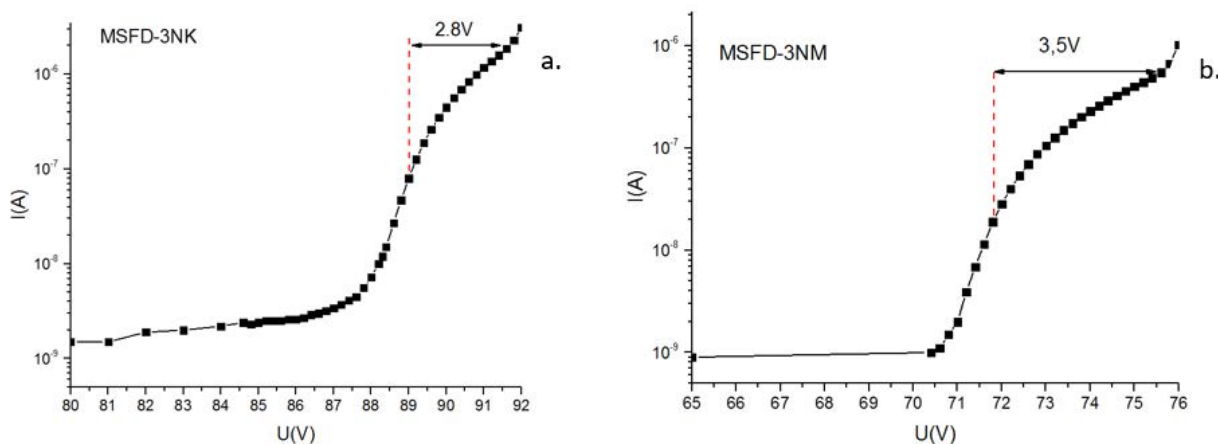
TƏCRÜBƏ VƏ NƏTİCƏLƏR

Təcrübələrdə istifadə edilən fotodiodlar Zekotek firmasının istehsal etdiyi dərin piksellə MSFD-3NK və

MSFD-3NM fotodiodlarıdır. İstifadə edilən MSFD-3NK fotodiodu cənubi Koreyanın NANOFAB (National NanoFab Center) mərkəzində (2013) və MSFD-3NM fotodiodu isə Malaysiyanın MIMOS (Malaysia's national Applied Research and Development Centre) mərkəzində (2019) istehsal edilmişdir. Hər iki tip fotodiodun piksel diametri və addımları eyni seçilmişdir. MSFD-3NK və 3NM fotodiodlarında piksel sıxlığı 10000 piksel/mm² olmuşdur [2]. Tədqiq edilən fotodiodun quruluşu şəkil 1-də verilmişdir. MSFD-3NM fotodiodlarında ikinci epitaksial təbəqənin qalınlığı azaldılaraq 3 mkm və birinci epitaksial təbəqənin aşqar konsentrasiyası artırılmışdır.



Şəkil 1. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodunun quruluşu.



Şəkil 2. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodunun tərs istiqamətdə volt-ampere xarakteristikası (VAX).

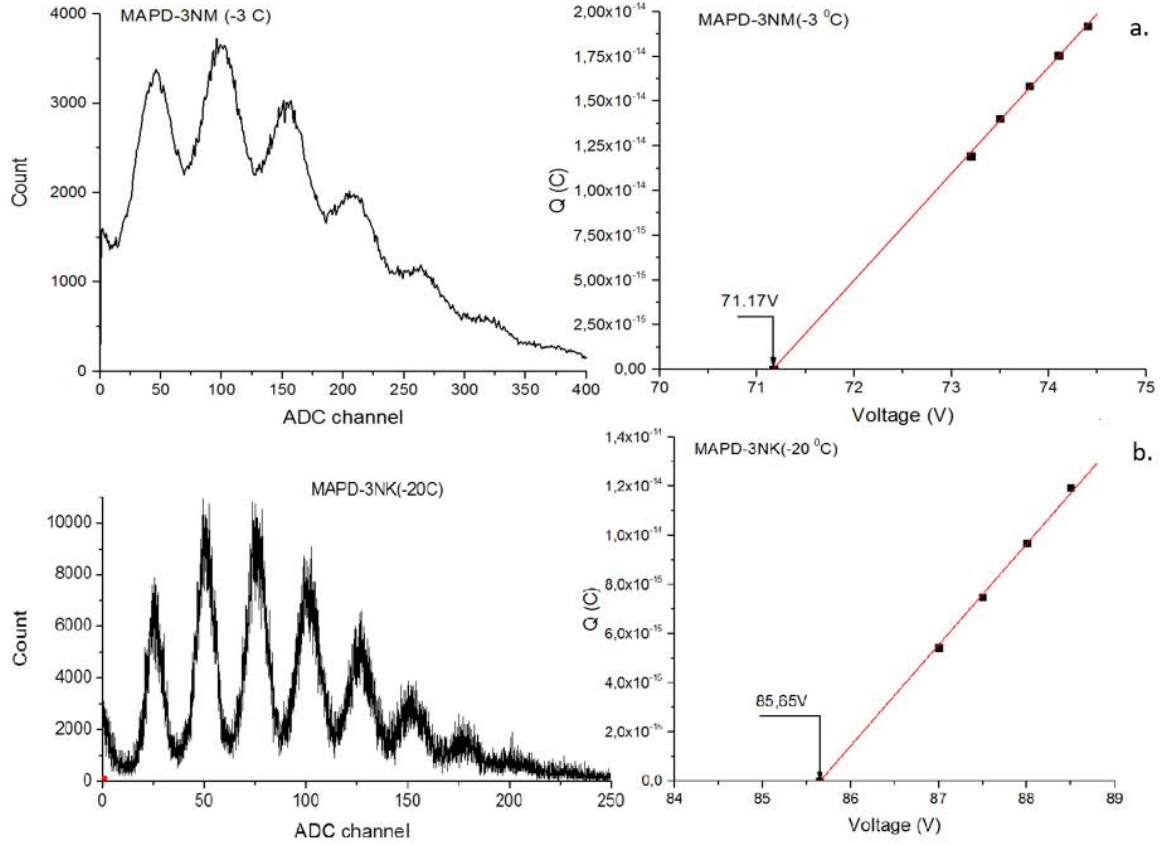
Fotodiodların volt-ampere (VAX) və volt farad (VFX) xarakteristikasını təyin etmək üçün Keithley 6487 və E7-20M Измеритель Иммитанс qurğusundan istifadə edilmişdir.

Şəkil 2-də MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodunun tərs istiqamətdə volt-ampere xarakteristikası verilmişdir. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodunda 80V isə 70.4V gərginliyə qədər olan rejim gücləndirmə əmsalının kiçik olduğu rejimə ($\Delta U < 0V$; burada $\Delta U = U_{tətbiiq} - U_{deşilmə}$, $U_{tətbiiq}$ - tətbiq edilən gərginlik və $U_{deşilmə}$ -deşilmə gərginliyidir) gücləndirmə əmsalının yüksək olduğu ifrat gərginlik oblastı ($\Delta U > 0V$) Heyger rejiminə uyğun gəlir. MSFD-3NK fotodiodunda ifrat gərginlik oblastı 89-91.6 V intervalını və MSFD-3NM fotodiodunda isə 71.6-75.6V intervalına uyğun gəlmişdir. İşləmə gərginliyində qaranlıq cərəyanı

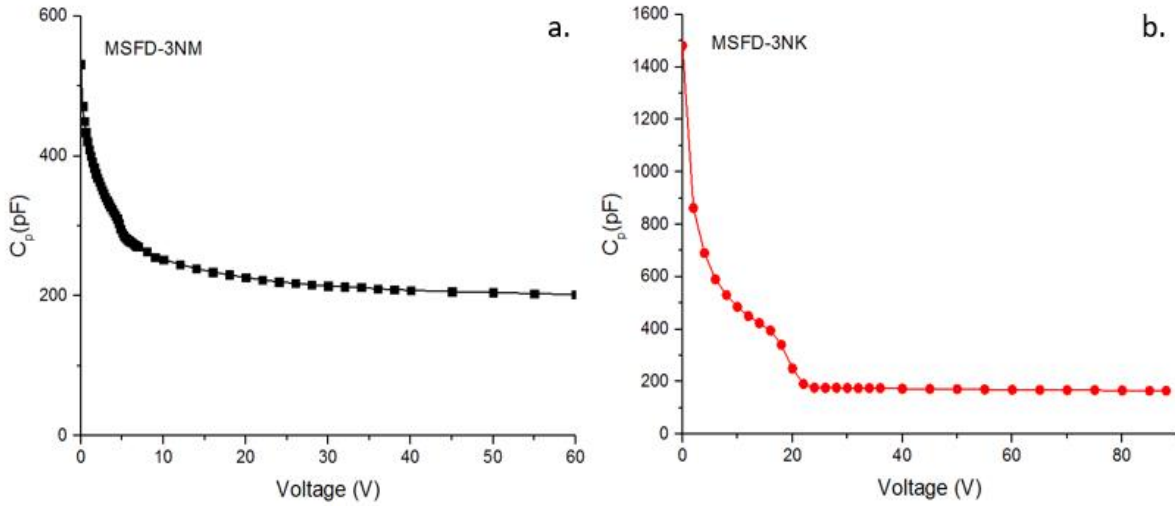
MSFD-3NK fotodiodunda 1569 nA və MSFD-3NM fotodiodunda 448 nA olmuşdur.

Şəkil 3-də (a) zəif işıq selindən istifadə edərək tək fotoelektronların paylanma spektri çəkilmişdir. MSFD-3NK fotodiodlarınındeşilmə gərginliyi 85.65 V və optimal gərginlikdə (88V) gücləndirmə əmsalı $\sim 6 \cdot 10^4$ olmuşdur (-20°C). Tətbiq edilən maksimal ifrat gərginliyi 2.85V-a qədər qaldırmaq mümkün olmuşdur. Bir pikselin tutumu isə 4.2 fF olmuşdur.

MSFD-3NM fotodiodlarında isədeşilmə gərginliyi 71.17 V olmuş və optimal gərginlikdə 74.5V gücləndirmə əmsalı $1.1 \cdot 10^5$ olmuşdur (-6°C) (Şəkil 3 b). MSFD-3NM fotodiodlarında maksimal ifrat gərginlik 3.53 V alınmışdır. Bir pikselin tutumu isə 5.7 fF olmuşdur. Yeni diodlarda ifrat gərginlik oblastı $\sim 24\%$ artaraq yaxşılaşmışdır.



Şəkil 3. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodlarında tək fotoelektronların amplitud paylanması və birinci fotoelektrona uyğun gələn yükün gərginlikdən asılılığı .



Şəkil 4. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodun tutumunun gərginlikdən asılılığı.

MSFD-3NK və MSFD-3M fotodiodlarının tutumunun ölçülməsi zamanı E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС cihazından istifadə edilmişdir (Şəkil 4). MSFD-3NK fotodiodunda gərginliyin 23 V qiymətində epitaksial təbəqə tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunur və tutum azalır. Gərginliyin 24 V-dan yuxarı qiymətlərində həcmi yüklər oblastının eni sabit qalır və sahə artır. Gərginliyin sonrakı böyük qiymətlərində MSFD-3NK fotodiodunun tutumu 176 pF olmuşdur. MSFD-3NM fotodiodunda isə gərginliyin 10 V-dan yuxarı qiymətlərində artıq hər iki epitaksial təbəqə həcmi

yüklərlə tam əhatə olunmuş və tutumun qiymətinin gərginlikdən asılı olaraq dəyişməsi azalmış və yeni diodun tutumu 202 pF olmuşdur. MSFD-3NM fotodiodlarının tutumunun artması epitaksial təbəqənin qalınlığının azalması ilə bağlıdır.

NƏTİCƏLƏR

Aparılan təcrübələr nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, optimal halda MSFD-3NM fotodiodunun gücləndirmə əmsalı MSFD-3NK fotodiodunun gücləndirmə

əmsalından 1.8 dəfə çox olmuşdur. MSFD-3NM foto• diodlarının ifrat gərginlik oblastı ~24% artırılaraq 3.53V qədər qaldırılmışdır. İşləmə gərginliyində MSFD-3NM fotodiounun qaranlıq cərəyanı MSFD• 3NK fotodiouduna nəzərən 3.5 dəfə azalmışdır. MSFD-3NM fotodiounun tutumu – 202 pF, MSFD-3NK foto• diodunun tutumu – 176 pF olduğu müəyyən edilmişdir. Alınan nəticələr göstərmişdir ki, yeni hazırlanmış MAPD-3NM diodu əksər parametrlərinə görə MSFD-3NK diodu üstələyir və əksər təcrübələrdə uğurla tətbiq oluna bilər.

Bununla yanaşı, növbəti illərdə istehsal ediləcək MSFD-3N.. fotodioidlərinin aşağıdakı parametrlərinin təkmilləşdirilməsi nəzərə alınmışdır:

- Qaranlıq cərəyanın azaldılması (epitaksial layın, yayferin qalınlığının azaldılması və keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması);

- İşləmə gərginliyinin 50-60V qədər azaldılmasının (epitaksial təbəqənin qalınlığını və aşqar konsentrasiyasını dəyişməklə)
- Gücləndirmə əmsalının artırılması (piksellerin tutumunun və ifrat gərginliyini artırmaqla)
- Foton qeydetmə effektivliyinin artırılması (ifrat gərginliyi və pikselin sahəsini artırmaqla)

MİNNƏTDARLIQ

Aparılan işlər Azərbaycan Respublikasının Prezidenti Yanında Elmin İnkişafı Fondunun № EİF — BGM-5-AZTURK-1/2018-2/01/1-M-01 nömrəli qrant layihəsi çərçivəsində yerinə yetirilmişdir.

- [1] Z. Sadygov, A. Olshevski, I. Chirikov, I. Zheleznykh, A. Novikov. Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: Their present status, maximum possibilities and limitations, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 567,(2006)70–73.
- [2] F. Ahmadov, G. Ahmadov, E. Guliyev, R. Mada-tov, A. Sadigov, Z. Sadygov, F. Zerrouk. New gamma detector modules based on micropixel avalanche photodiode. J. Instrum. 12, 2017, C01003.
- [3] Z. Sadygov, A. Sadigov, and S. Khorev. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2020, vol. 17, No. 2, pp. 160–176.
- [4] M. Holik, F. Ahmadov, G. Ahmadov, R. Akbarov, D. Berikov, Y. Mora, S. Nuruyev, P. Pridal, A. Sadigov, Z. Sadygov, J. Zich. Miniaturized read-out interface “Spectrig MAPD” dedicated for silicon Photomultipliers, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 2020, A 978, p.164–444
- [5] N. Dinu et al.. Characteristics of a prototype matrix of Silicon PhotoMultipliers (SiPM), 2009 JINST4 P03016.
- [6] V. Regazzoni, F. Acerbi, G. Cozzi, A. Ferri, C. Fiorini, G. Paternoster et al.. Characterization of high-density SiPM non-linearity and energy resolution for prompt gamma imaging applications, 2017 JINST 12 P07001.
- [7] Nicola D’Ascenzo, E. Garutti, M. Goettlich, H.C. Schultz-Coulon, A. Tadday. The direct read-out of organic and inorganic scintillators with the Multi Pixel Photon Counter, DESY 08-047, 2008, arxiv.org/abs/0805.0525.
- [8] D. Renker. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2006, v 567, p. 48-56.
- [9] D. Renker. Advances in solid state photon detectors, 2009 JINST 4 P04004
- [10] M. Grodzicka-Kobylka, T. Szczesniak, M. Moszyński, Comparison of SensL and Hamamatsu 4x4 channel SiPM arrays in gamma spectrometry with scintillators, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2017, 856, p. 53–64
- [11] Y. Nakamura, K. Shimazoe, H. Takahashi. Silicon Photomultiplier-Based Multi-Channel Gamma Ray Detector Using the Dynamic Time-Over-Threshold method, 2016 JINST 11 C02016
- [12] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s14160-1310ps_etc_kapd1070e.pdf
- [13] http://www.hamamatsu.com.cn/UserFiles/Download/Product/s12572-25_etc_kapd1043e03.pdf
- [14] Z.Ya. Sadygov. “Microchannel avalanche photodiode,” RF Patent, 2008, No. 2316848.
- [15] Z.Sadygov, A.F.Zerrouk, A.Ariffin, S.Khorev, J.Sasam, V. Zhezher, et.al.. Performance of new Micro-pixel Avalanche Photodiodes from Zecotek Photonics, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect., 2009, A 610, 381-383.
- [16] N. Anfimov, I. Chirikov-Zorin, A. Dovlatov, O.Gavrishchuk, A. Guskov, N. Khovanskiy, Z.Krumshtein, R. Leitner, G. Meshcheryakov, A. Nagaytsev, A. Olchevski, T. Rezinko, A.Sadovskiy, Z. Sadygov, I. Savin et al.. “Beam test of Shashlyk. EM calorimeter prototypes readout by novel MAPD with super high linearity,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. 2010, A 617, p.78-80.
- [17] N. Anfimov, I. Chirikov-Zorin, A. Dovlatov, O.Gavrishchuk, A. Guskov, N. Khovanskiy, Z.Krumshtein, R. Leitner, G. Meshcheryakov, A. Nagaytsev, A. Olchevski, T. Rezinko, A.Sadovskiy, Z. Sadygov, I. Savin, V. Tchalyshev, I. Tyapkin, G. Yarygin, and F.Zerrouk. “Novel micropixel avalanche photodiodes (MAPD) with super high pixel density,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 2011, 628, 369-371.
- [18] S. Nuruyev, G. Ahmadov, A. Sadigov, R. Akberov, F. Ahmadov, M. Holik and Yu. Kopatch. Performance of silicon photomultipliers at low temperature, J. Instrum. 15, 2020, C03003
- [19] <https://www.picotech.com/library/application-note/pt100-platinum-resistance-thermometers>

**F.I. Ahmadov, G.S. Ahmadov, Z.Y. Sadygov, A.Z. Sadigov, A.H. Mammadli,
N.V. Sadigova, M. Holik, E. Yilmaz**

INVESTIGATION OF PARAMETERS OF NEW SILICON PHOTOMULTIPLIERS MAPD-3NM

The results of studies of MAPD-3NK and MAPD-3NM with deep-immersed pixel arrangement, manufactured by Zecotek were presented. The volt-ampere and capacitance-voltage characteristics, gain and breakdown voltage of photodiodes were investigated by experimental methods.

**Ф.И. Ахмедов, Г.С. Ахмедов, З.Я. Садыгов, А.З. Садыгов, А.Г. Маммедли,
Н.В. Садыгова, М. Холик, Э. Йылмаз**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ
ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ MAPD-3NM**

В работе представлены результаты исследований МЛФД -3NK и МЛФД-3NM с глубоководным расположением пикселей, произведенных фирмой Zecotek. Экспериментальными методами были исследованы вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики, коэффициент усиления и пробивное напряжение фотодиодов.

Qəbul olunma tarixi: 21.10.2020