

Алмазный детектор для регистрации ионизирующих излучений с малой линейной передачей энергии

**Е. В. ГЛАДЧЕНКОВ, К. В. ЗАХАРЧЕНКО, А. Ф. КАПЕРКО,
В. А. КОЛЮБИН, В. П. КУЛАГИН, П. Г. НЕДОСЕКИН**

*Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия, e-mail: akaperko@hse.ru*

Разработан и исследован радиационно стойкий детектор на основе алмаза для регистрации потоков частиц космического излучения с малой линейной передачей энергии. Данный прибор можно использовать для регистрации γ -излучения ядерных водо-водяных энергетических реакторов. Определены характеристики детектора при воздействии β -излучения, проведено моделирование его сигналов при β - и γ -излучениях. Применение многослойной алмазной структуры позволяет увеличить отношение сигнал—шум и расширить динамический диапазон измерений линейной передачи энергии частиц космического излучения.

Ключевые слова: алмазный детектор; космическое излучение; космический аппарат; радиационная обстановка; линейная передача энергии.

A radiation-hard diamond-based detector for the registration of cosmic ray particles with low linear energy transfer has been developed and investigated. The device can be used for detection of gamma-radiation of PWR-type of nuclear reactors. The characteristics of the detector, when exposed to beta radiation, have been determined experimentally. The simulation of the detector signals, when exposed to beta and gamma radiation, has been carried out. The analysis of the results shows that the use of multi-layered diamond structure can increase the signal-to-noise ratio and range of linear transfer of energy of cosmic ray particles.

Key words: diamond detector; cosmic radiation; spacecraft; radiation situation; linear energy transfer.

Увеличение сроков активного существования космических аппаратов до 20—25 лет приводит к повышению дозовой нагрузки на электронные компоненты бортовых комплексов и возрастанию вероятности повреждений бортовой аппаратуры при воздействии высокоэнергетических протонов или тяжёлых заряженных частиц космического пространства. Для надёжного функционирования бортового оборудования необходим непрерывный мониторинг потоков космических излучений. Проведение мониторинга возможно только при использовании датчиков радиационной обстановки с повышенной радиационной стойкостью. Для разработки таких приборов наиболее перспективным материалом является алмаз, имеющий рекордно высокую стойкость к воздействию всех факторов космического пространства [1, 2]. Радиационная стойкость алмазных датчиков составляет 5 Мрад, а максимальные рабочие температуры достигают 200 °C [3, 4].

Однако использование алмазных пластин в качестве чувствительных элементов детектора ионизирующего излучения имеет некоторые специфические особенности. Для максимального сбора заряда, образующегося при взаимодействии с ионизирующей частицей в алмазной пластине, её толщину надо выбирать в пределах 0,3—0,5 мм, так как эффективный сбор достигается при напряжённости электрического поля не менее 0,5—1,0 В/мкм. Для кварцевых пластин это значение составляет 0,27 В/мкм [5]. Следовательно, при толщине алмазной пластины более 0,5 мм к ней необходимо прикладывать напряжение смещения больше 250—500 В, что приводит к появлению значительных токов утечки по её поверхности и, соответственно, увеличению шума детектора. Уменьшение толщины алмазного детектора по-

зволяет осуществлять эффективный сбор заряда при пониженных напряжениях смещения, но при этом энергия, передаваемая прибору ионизирующей частицей, также уменьшается. Это приводит к падению амплитуды выходного сигнала алмазного детектора и понижению отношения сигнал—шум.

В настоящее время для улучшения характеристик алмазных детекторов широко изучают различные конструкции этих приборов [6—14]. Данная работа посвящена исследованию возможностей повышения отношения сигнал—шум при использовании многослойных алмазных структур. Была проанализирована эффективность многослойной структуры алмазного детектора для регистрации β - и γ -излучений. Такие излучения отличаются низкими значениями линейной передачи энергии (ЛПЭ), из-за чего амплитуда сигналов детекторов при регистрации излучений данных видов мала. В связи с этим поставленный вопрос является актуальным.

На рис. 1 представлена структура двухслойного алмазного детектора, состоящего из пластин I, II, на грани которых нанесены металлические контактные слои 1—3. Пластины расположены одна под другой так, чтобы поток ионизирующих частиц проходил через обе. Контактные слои пластин с помощью проводников подсоединены к электронной схеме регистрации. Если контакты 1, 3 подсоединить к источнику напряжения смещения, а контакт 2 — ко входу зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ), то заряды, образовавшиеся в верхней и нижней пластинах, будут суммироваться. Таким образом, можно увеличить эффективную толщину детектора и, соответственно, амплитуду его выходного сигнала. При этом не потребуется повышать напряжение смещения, а увеличение сигнала детектора не будет сопровождаться ростом шума из-за токов утечки.

Рассмотрим работу двухслойного алмазного детектора. Суммарный выходной заряд Q_{Σ} можно описать соотношением

$$Q_{\Sigma} = Q_I + Q_{II}, \quad (1)$$

где Q_I , Q_{II} — заряды, образовавшиеся при регистрации ионизирующих частиц в алмазных пластинах I, II, соответственно.

Определим заряд Q , возникший в алмазной пластине под действием частицы ионизирующего излучения [15, 16]:

$$Q = \alpha e k (\Delta E / E_0), \quad (2)$$

где α — параметр, определяющий подключение алмазной пластины ко входу ЗЧУ (если $\alpha = 1$ — пластина подключена, если $\alpha = 0$ — не подключена); $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд; k — эффективность сбора заряда в алмазной пластине ($k \approx 0,9$ для алмазов электронного качества при напряжённости электрического поля больше 0,5 В/мкм); ΔE — энергия, переданная ионизирующей частицей алмазной пластине; $E_0 = 13,2$ эВ — средняя энергия, необходимая для образования одной электронно-дырочной пары в кристалле алмаза под действием ионизирующего излучения.

Энергию, переданную алмазной пластине ионизирующей частицей, найдём из [17]

$$\Delta E = \int_0^z (\rho L(E)) dz, \quad (3)$$

где $L(E)$ — ЛПЭ заряженных частиц в среде; $\rho = 3,515$ г/см³ — плотность алмаза; z — толщина алмазной пластины.

Объединив (1)–(3), можно получить выражение для суммарного заряда на входе ЗЧУ:

$$Q_{\Sigma} = \frac{ep}{E_0} \left(\alpha_1 k_1 \int_0^{z_1} L(E)_1 dz_1 + \alpha_2 k_2 \int_0^{z_2} L(E)_2 dz_2 \right), \quad (4)$$

где индексы 1, 2 обозначают величины, относящиеся к пластинам I, II, соответственно.

Для тонких детекторов справедливо, что при прохождении через пластины I, II ЛПЭ ионизирующего излучения приближённо можно представить как $L(E)_1 = L(E)_2 = L(E)$. Тогда (4) преобразуется в следующий вид:

$$Q_{\Sigma} = (epL(E)/E_0) (\alpha_1 k_1 z_1 + \alpha_2 k_2 z_2). \quad (5)$$

Из (5) следует, что суммарный заряд Q_{Σ} , образующийся в двухслойном алмажном детекторе, пропорционален суммарной толщине алмазных пластин детектора ($z_1 + z_2$).

Двухслойный алмазный детектор исследовали на макете, состоящем из пластин размерами 2,0×2,0×0,35 мм (пластина I) и 2,5×2,5×0,18 мм (пластина II). На каждую сторону пластин методом магнетронного распыления в среде Ar при давлении 10 мТорр нанесли контактные слои Ti/Al толщиной 50/100 нм. С контактного слоя каждой пластины вывели электрический контакт в виде золотого проводника диаметром 40 мкм. Сварку проводили на ультразвуковой установке. С помощью пасты, содержащей серебро, пластины соедини-

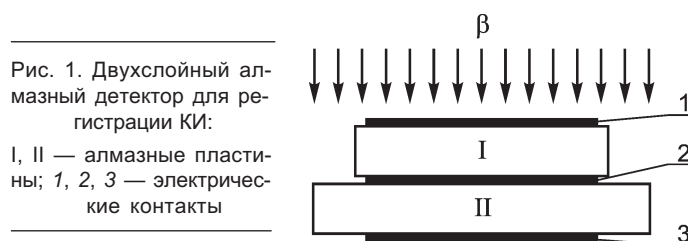


Рис. 1. Двухслойный алмазный детектор для регистрации ИИ:

I, II — алмазные пластины; 1, 2, 3 — электрические контакты

ли контактными плоскостями. Торцы пластин покрыли эпоксидным лаком.

Характеристики двухслойного алмазного детектора измеряли на стенде, включающем макет детектора, источник β-излучения, спектрометрический предусилитель и 1024-канальный спектрометр. Алмазный детектор, источник излучения и предусилитель размещались внутри экранирующего корпуса. Напряжение смещения, подаваемое на алмазные пластины, составляло 100 В.

Для оценки эффективности исследуемого детектора измерения проводили для трёх вариантов регистрации сигнала. В первом случае (вариант 1) напряжение смещения подавали на контакт 2, а контакт 1 присоединяли ко входу ЗЧУ. При этом регистрировался сигнал с пластины I. Затем (вариант 2) напряжение смещения подавали на контакт 2, а ко входу ЗЧУ присоединяли контакт 3. Теперь регистрировался сигнал с пластины II. И, наконец, (вариант 3) напряжение смещения подавали на контакт 2, а контакты 1, 3 параллельно подсоединяли ко входу ЗЧУ. В этой ситуации регистрировался суммарный сигнал с обеих пластин, т. е. был реализован вариант многослойного алмазного детектора.

На рис. 2 приведены спектры выходного заряда двухслойного алмазного детектора при регистрации β-частиц для различных вариантов регистрации сигнала. Резкое падение сигнала при зарядах ниже 1,3 фКл обусловлено применением амплитудной дискриминации, вызванной шумами детектора. При регистрации суммарного сигнала от обеих пластин (вариант 3) спектр смещается в сторону больших амплитуд по сравнению со спектрами, полученными при регистрации сигналов от одной алмазной пластины (варианты 1, 2).

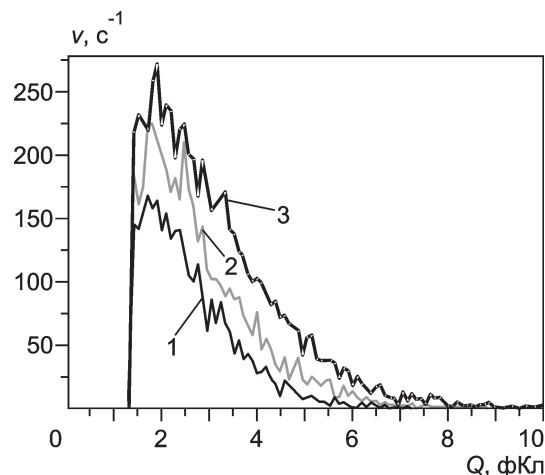


Рис. 2. Спектры выходного заряда двухслойного алмазного детектора при воздействии β-излучения для различных вариантов (1—3) регистрации сигнала

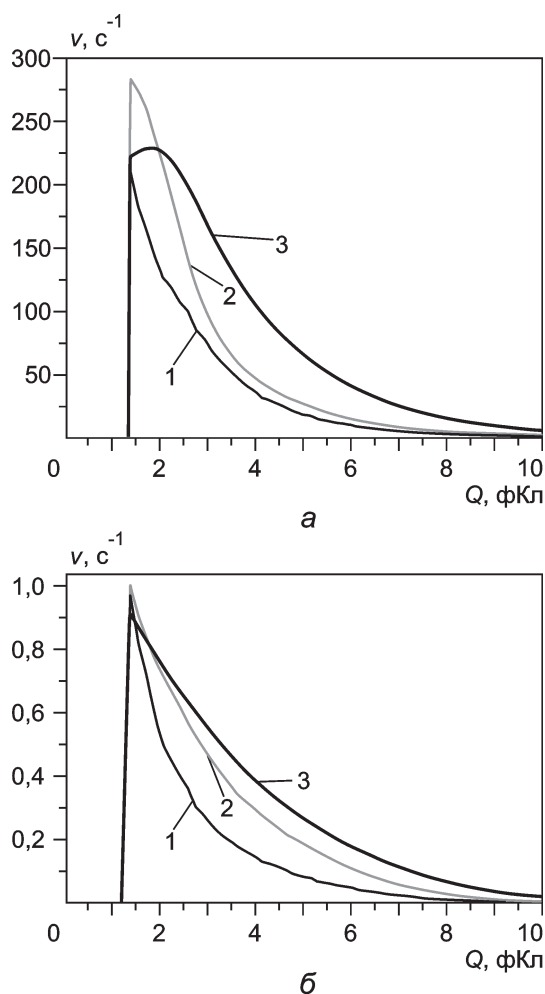


Рис. 3. Спектры выходного заряда многослойного алмазного детектора при воздействии β -излучения (а) и γ -излучения (б), полученные в результате моделирования в среде Geant4 для различных вариантов (1—3) регистрации сигнала

Все три спектра можно сравнить, если сопоставить значения выходных зарядов в различных вариантах регистрации при одинаковых энергиях падающих электронов. У одинаковых потоков электронов энергии равны и соответствуют одинаковым скоростям счёта детектора в различных вариантах регистрации, приведённым к равным площадям поверхности приборов. Следовательно, анализ откликов многослойного алмазного детектора в заданном узком диапазоне скоростей счёта β -частиц соответствует анализу выходного заряда детектора для частиц одной энергии.

Отметим, что в варианте 3 наблюдается возрастание скорости счёта для малых зарядовых сигналов (до 2,5 фКл). Эти сигналы связаны с регистрацией низкоэнергетических β -частиц. В вариантах 1, 2 данные частицы не регистрируются из-за того, что они передают алмазным пластинам малую энергию, недостаточную для превышения сигнала над уровнем шумов. Таким образом, использование двухслойного детектора позволяет расширить диапазон энергий частиц, которые регистрируются детектором, сохранив высокую эффективность сбора заряда.

Для анализа выходных зарядовых сигналов многослойных алмазных детекторов различных конфигураций соглас-

но соотношению площадей алмазных пластин была выбрана скорость счёта β -частиц, равная 64 имп/с для варианта 1 регистрации и 100 имп/с — для вариантов 2, 3. Выбранные скорости счёта соответствуют средней энергии β -частиц и значениям выходного сигнала 3,16; 3,09; 3,95 фКл для вариантов регистрации 1, 2, 3, соответственно. Соотношение амплитуд выходных сигналов для рассматриваемых вариантов регистрации составляет 1,02:1:1,28. Это соотношение отличается от пропорции 2:1:3, полученной из формулы (5) с учётом толщин алмазных пластин.

По данным NIST [18] в приближении непрерывного замедления (CSDA, [19]) было рассчитано среднее значение линейной передачи энергии β -частиц при прохождении через многослойную алмазную структуру, равное 1,9 МэВ см²/г. Данное значение соответствует амплитудам выходного сигнала, равным 2,8; 1,2; 3,6 фКл для вариантов регистрации 1, 2 и 3, соответственно.

Расхождение результатов аналитического расчёта с результатами эксперимента объясняется тем, что при взаимодействии β -частиц с алмазной пластиной имеет место их сильное рассеяние, что приводит к существенному увеличению длины траектории частиц в алмазе. Из-за этого энергия, передаваемая β -частицами алмазным пластинам, возрастает, что приводит к заметному увеличению амплитуды выходного сигнала по сравнению с расчётным значением. Наибольшие отклонения результатов эксперимента от результатов расчёта наблюдаются для варианта регистрации 2, в котором регистрируется сигнал с нижней алмазной пластины. Это может быть связано со значительным замедлением β -частиц после прохождения верхней пластины, что приводит к увеличению их линейной передачи энергии, а также с попаданием в нижнюю пластину β -частиц, рассеянных под большими углами и, следовательно, проходящих большие пути в алмазе.

Для более точного определения энергий, передаваемых алмазным пластинам, с помощью пакета программ Geant4 провели моделирование прохождения β -частиц через двухслойную структуру алмазного детектора [20]. Рассчитанные спектры выходного зарядового сигнала многослойного алмазного детектора для различных вариантов регистрации приведены на рис. 3, а. Отметим, что спектры, полученные в результате моделирования, совпадают со спектрами, найденными экспериментально. При этом амплитудная дискриминация зарядов составляет менее 1,3 фКл. Спектры выходного сигнала и экспериментальные спектры анализировали аналогичным образом. Значения выходного зарядового сигнала алмазного детектора, полученные экспериментально и путём моделирования в среде Geant4, приведены в табл. 1. Результаты расчёта и эксперимента совпадают в пределах погрешности. Различие этих значений не превышает 6 %.

Таблица 1

Амплитуды сигналов алмазного детектора при воздействии β -излучения, полученные экспериментально и путём математического моделирования

Вариант регистрации сигнала	Скорость счёта v , с ⁻¹	Амплитуда выходного сигнала алмазного детектора, Q, фКл	
		Эксперимент	Моделирование
1	64	3,16±0,12	3,18±0,03
2	100	3,09±0,10	2,96±0,03
3	100	3,95±0,18	4,10±0,04

Таким образом, использование многослойных алмазных детекторов для регистрации ионизирующих частиц космического излучения, в особенности имеющих низкую ЛПЭ, достаточно перспективно.

Возможность использования алмазных детекторов в качестве датчиков γ -излучения ядерных реакторных энергетических установок для космических аппаратов с длительным сроком пребывания в космическом пространстве, а также ядерных водо-водяных энергетических реакторов представляет практический интерес. При очевидных преимуществах алмазных детекторов, таких как высокие радиационная и температурная стойкости, этот детектор обладает недостаточной эффективностью регистрации γ -квантов. Алмаз слабо взаимодействует с γ -излучением из-за низкого заряда ядер углерода. Поэтому точностные характеристики приборов регистрации γ -излучения, построенных на алмазных детекторах, существенно ухудшаются.

Было проведено моделирование спектров выходного сигнала двухслойного алмазного детектора при воздействии потока γ -излучения с энергией 0,66 МэВ. На рис. 3, б представлены результаты моделирования. Полученные данные анализировали, как и в случае β -излучения. В табл. 2 представлены амплитуды сигналов, соответствующие равным скоростям счёта детектора в различных вариантах регистрации этих сигналов. Скорости счёта соответствовали площадям алмазных пластин. Их выбирали равными половине максимальной скорости счёта. Из приведённых графиков (см. рис. 3, б) и табл. 2 следует, что амплитуда сигналов, полученных в варианте регистрации 3, заметно превышает уровень шумов. Таким образом, использование двухслойной структуры алмазного детектора позволяет эффективно регистрировать ионизирующее излучение с низкой ЛПЭ.

Таблица 2

Амплитуды сигналов алмазного детектора при воздействии γ -излучения, полученные путём математического моделирования

Вариант регистрации сигнала	Скорость счёта ν , отн. ед.	Амплитуда выходного сигнала алмазного детектора Q, фКл
1	0,5	2,06±0,02
2	0,5	2,85±0,02
3	0,5	3,29±0,03

Заключение. Результаты экспериментальных и теоретических исследований двухслойного алмазного детектора при воздействии β - и γ -излучений позволяют сделать следующие выводы:

применение двухслойного детектора для регистрации β -излучения обеспечивает увеличение соотношения сигнал—шум по меньшей мере на 25 % по сравнению с однослойным детектором, а следовательно, позволяет повысить точность измерения ЛПЭ частиц;

двухслойный алмазный детектор позволяет эффективно регистрировать γ -излучение ядерных водо-водяных энергетических реакторов и может использоваться для создания дозиметрических датчиков ядерных установок для космических аппаратов с длительным сроком существования;

результаты исследований характеристик двухслойной структуры алмазного детектора можно распространить и на детекторы с большим числом слоёв. Структуры с числом

слоёв 3—5 можно эффективно использовать для построения аппаратуры регистрации дозовой обстановки на космических аппаратах, имеющих ядерную энергетическую установку и предназначенных для длительного пребывания в космическом пространстве.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор RFMEFI 60514X0001).

Л и т е р а т у р а

1. Кадилин В. В., Колюбин В. А., Львов С. А., Недосекин П. Г., Идалов В. А., Тюрин Е. М., Колесников С. В., Самосадный В. Т. Перспективы применения алмазных детекторов для регистрации заряженных частиц космического излучения // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 2. С. 138—144.
2. Захарченко К. В., Каперко А. Ф., Колюбин В. А., Кулагин В. П., Львов С. А., Недосекин П. Г., Чумаченко Е. Н. Спектрометрический алмазный детектор потоков ионизирующего излучения для транспортных космических систем // Измерительная техника. 2015. № 6. С. 63—67.
3. Davydov L. N., Rybka A. V., Vierovkin A. A., Dudnik S. F., Gritsyna V. I., Kutny V. E., Opalev O. A., Shevchenko V. A., Shlyahov I. N., Strelnitsky V. E., Tenishev A. E., Uvarov V. L., James R. B., Bolotnikov A. E., Fochuk P. M. Registration of high-intensity electron and x-ray fields with polycrystalline CVD diamond detectors // Proc. SPIE. 2012. V. 8507. N. 12. P. 85071.
4. Wodniak I., Drozdowicz K., Dankowski J., Gabanska B., Igielski A., Kurowski A., Marczevska B., Nowak T., Woźnicka U. CVD diamond detectors for fast alpha particles escaping from the tokamak D-T plasma // NUKLEONIKA. 2011. V. 56. P. 143—147.
5. Пластилин Ю. А., Скрыбышев И. Ю. Электростатические явления вблизи низкоорбитальных космических аппаратов // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 52—57.
6. Conte G., Allegrini P., Pacilli M., Salvatori S., Kononenko T. V., Bolshakov A. P., Ralchenko V. G., Konov V. I. Three-dimensional graphite electrodes in CVD single crystal diamond detectors: charge collection dependence on impinging beta-particles geometry // Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A. 2015. V. 799. P. 10—16.
7. Pat. 2011191255 JP (A). Radiation detector I. Toshichi, S. Hidenori / Univ Osaka. Hitachi Aloka Medical LTD. 2011.
8. Pat. 103746036 CN (A). Preparation method for ohmic contact electrode of diamond radiation detector L. Wang, Y. Yang, J. Zho, B. G. Ren, J. N. Wang, J. Huang, K. Tang, J. Zhang, Y. Xia / Univ Shanghai. 2014.
9. Пат. 2522772 РФ. Алмазный детектор / Амосов В. Н., Емельянов А. И., Криско Н. И., Родионов Н. Б. // 2014. Изобретения. Полезные модели. Бюл. № 20.
10. Burkart F., Blanco J., Borburgh J., Dehning B., Di Castro M., Lechner A., Lendaro J., Loprete F., Losito R., Montesano S., Schmidt R., Wollmann D., Zerlauth M. Diamond particle detector properties during high fluence material damage tests and their future applications for machine protection in the LHC // Geneva and CIVIDEC Instrumentation, Wien. Proc. IPAC 2013, Shanghai, China. 2013.
11. Weiss C., Griesmayer E., Guerrero C. A new CVD Diamond Mosaic-Detector for (n, a) Cross-Section Measurements at the n_TOF Experiment at CERN // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 2013. V. 732. P. 190—194.

12. Jansen H., Alvarez Sanchez P., Bart Pedersen S., Dehning B., Dobos D., Effinger E., Ferrari A., Griesmayer E., Gschwendtner E., Kozsar I., Missiaen D., Pernegger H., Sala P. R., Serrano J., Ward C. Verification of the CNGS Timing System using Fast Diamond Detectors // J. of Inst. 2013. V. 8. P. 01017.

13. Weiss C., Griesmayer E., Guerrero C. Response of CVD Diamond Detectors to 14 MeV Neutrons // CERN-ATS-Note-2012-093 TECH, 2012-11-16, 2012.

14. Pat. 20110233418 US. Horstall A. B., Silvie J. A. Radiation detector // Bae Systems. plc (London, GB. 2011).

15. Маталин Л. А., Чубаров С. И., Тимохин Л. А., Смирнов В. И., Нестеренко В. С. Электронные методы ядерной физики. М.: Атомиздат. 1973.

16. Козлов С. Ф. Алмазные детекторы ядерных излучений. Алмаз в электронной технике. М.: Энергоатомиздат. 1990.

17. Попов В. И. Методы ЛПЭ — спектрометрии ионизирующих излучений. М.: Атомиздат. 1978.

18. NIST: Stopping-power and range tables for electrons [Электрон. версия]: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> (дата обращения 16.05.2016).

19. Carron N. J. An Introduction to the Passage of Energetic Particles through Matter. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2007.

20. Geant4: A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter [Офици. сайт] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/> (дата обращения 15.03.2016).

Дата принятия: 15.06.2016.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

576.332:621.3.005.1

Методика измерений поляризуемости клеток в неоднородном переменном электрическом поле

К. В. ГЕНЕРАЛОВ¹, В. М. ГЕНЕРАЛОВ¹, М. В. КРУЧИНИНА²,
Г. В. ШУВАЛОВ³, Г. А. БУРЯК¹, А. С. САФАТОВ¹

¹ Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор», п. Кольцово, Новосибирская обл., Россия, e-mail: vector.nsr.ru

² Научно-исследовательский институт терапии и профилактики СО РАМ, Новосибирск, Россия, e-mail: kruchmargo@yandex.ru

³ Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, Новосибирск, Россия, e-mail: gvshuvalov@mail.ru

Приведены экспериментальная методика и результаты измерений поляризуемости эритроцитов крови человека и латексных частиц в неоднородном переменном электрическом поле. Показано, что экспериментальные и теоретические значения поляризуемости латексных частиц совпадают.

Ключевые слова: диэлектрофорез, поляризуемость, эритроцит, частица.

The experimental method is described and the measurement results of the value of polarizability of erythrocytes and latex particles in a non-uniform alternating electric field are presented. The results show that the values of experimentally measured and theoretically calculated polarizability of latex particles are in good agreement.

Key words: dielectrophoresis, polarizability, erythrocyte, particles.

Для изучения патогенеза многих заболеваний человека необходимо всестороннее исследование клеток крови [1]. В середине прошлого века была создана теория диэлектрофореза, описывающая поведение клеток в неоднородном переменном электрическом поле (НПЭП) [2, 3]. Накопленные за последние 50 лет экспериментальные данные свидетельствуют о новых уникальных возможностях исследования клеток с помощью НПЭП в широком диапазоне частот. Клетка крови, а также её молекулы, белки и многочисленные компоненты поляризуются во внешнем электрическом

поле. Поляризация характеризует процесс перераспределения электрических зарядов по всему объёму клетки, её физико-химическую и структурную уникальность. Описать поляризацию можно с помощью феноменологического коэффициента пропорциональности объёмной поляризуемости a (далее — поляризуемость) [4, 5]. Связь между свойствами клетки на макроскопическом уровне и её структурой, количеством, концентрацией атомов и молекул показана на амплитудно-частотной характеристике поляризуемости [6–8]. Прикладные методы диэлектрофореза долгое время не