

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИСКРОВОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРОМ

К. В. Артемьев, В. Д. Малахов, Л. В. Колик, А. М. Давыдов,
Н. Г. Гусейн-заде

В работе исследовались электрические параметры искровых наносекундных разрядов, генерируемых пьезотрансформатором. Искра возникла в воздушном зазоре длиной 3 мм между выходным (высоковольтным) торцом пьезотрансформатора и незаземленным металлическим цилиндром ($h = 12.3$ мм и $D = 8.6$ мм). Проведены оценки потребляемой разрядами активной мощности (средней за период), энерговыклад, получена осциллограмма тока и построена зависимость напряжения на воздушном зазоре от времени.

Ключевые слова: пьезотрансформатор, искровой разряд, ВАХ, активная мощность.

Введение. В последние годы возник интерес к пьезотрансформаторам как основе компактных источников низкотемпературной плазмы [1–7]. С помощью пьезотрансформатора могут быть реализованы различные типы разрядов: плазмджет, диэлектрический барьерный разряд (ДБР), коронный и искровой. Такие типы разрядов активно внедряются в практику плазменной медицины [5, 8, 9] и поэтому становится необходимым знание всех параметров таких разрядов, в том числе и электрических – ВАХ, активная мощность и энерговыклад в разряд.

Особенностью искрового разряда, генерируемого с помощью пьезотрансформатора, является то, что его параметры существенным образом зависят от типа нагрузки. Целью данной работы было определение энерговыклада, а также вольт-амперных характеристик искрового разряда, который генерировался в воздухе между пьезотрансформатором и незаземленной металлической поверхностью – медным цилиндром высотой 12.3 мм и диаметром 8.6 мм, который располагался на диэлектрическом столе. Длина

воздушного зазора между пьезотрансформатором и металлической поверхностью была 3 мм. Временные зависимости тока и напряжения разряда необходимы для последующего анализа элементарных процессов в плазме разряда, которые в свою очередь дают представления о кинетических процессах разряда и о наработке активных частиц.

На рис. 1 показаны интегральные фотографии искровых разрядов, генерируемых пьезотрансформатором. Из рис. 1 видно, что в результате передачи потенциала от высоковольтной части пьезотрансформатора на металлическую поверхность у основания металлического цилиндра образовывались микроразряды (ДБР), которые необходимо учитывать при оценке энергетических затрат источника питания.

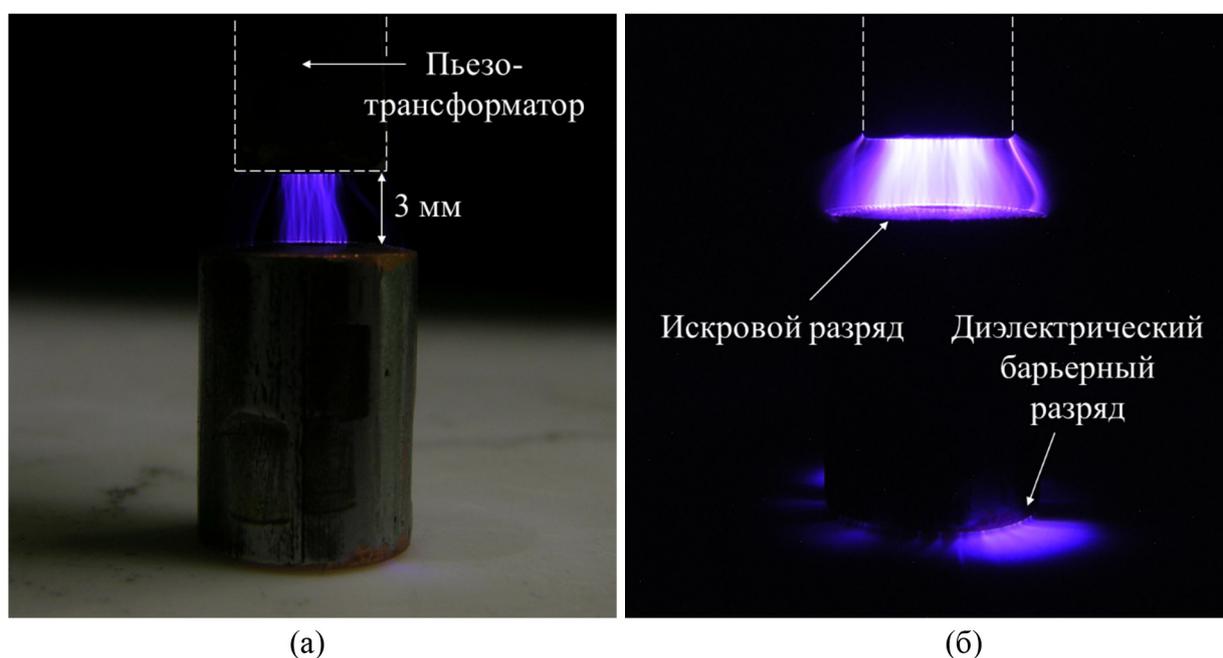


Рис. 1: Интегральные фотографии искрового разряда в воздухе, периодически генерируемого между пьезотрансформатором и металлической поверхностью: (а) экспозиция кадра 0.25 с, (б) экспозиция кадра 8 с.

Экспериментальная часть. В эксперименте использовался пьезотрансформатор Розена из ЦТС-керамики (цирконат-титанат свинца) с частотой основного резонанса ≈ 22 кГц и коэффициентом трансформации 150 (при нагрузке 100 Мом). Размеры пьезотрансформатора – $80 \times 6 \times 3$ мм³. Емкость выходной (высоковольтной) части пьезотрансформатора 6 пФ.

Источник питания, блок-схема которого показана на рис. 2, основан на трансформаторе напряжения и управляемом ШИМ-генераторе для регулировки частоты и ам-

плитуды подаваемого напряжения. Частота подаваемого напряжения на пьезотрансформатор равна частоте его основного резонанса 22 кГц, а амплитуда подаваемого напряжения была равна 85 В (60 В – среднееквадратичное значение). Входное напряжение пьезотрансформатора регистрировалось с помощью делителя напряжения с коэффициентом деления 1:10, входной ток регистрировался калиброванным токосъемником F-16M (FCC/HP) с частотным диапазоном от 100 Гц до 50 МГц.

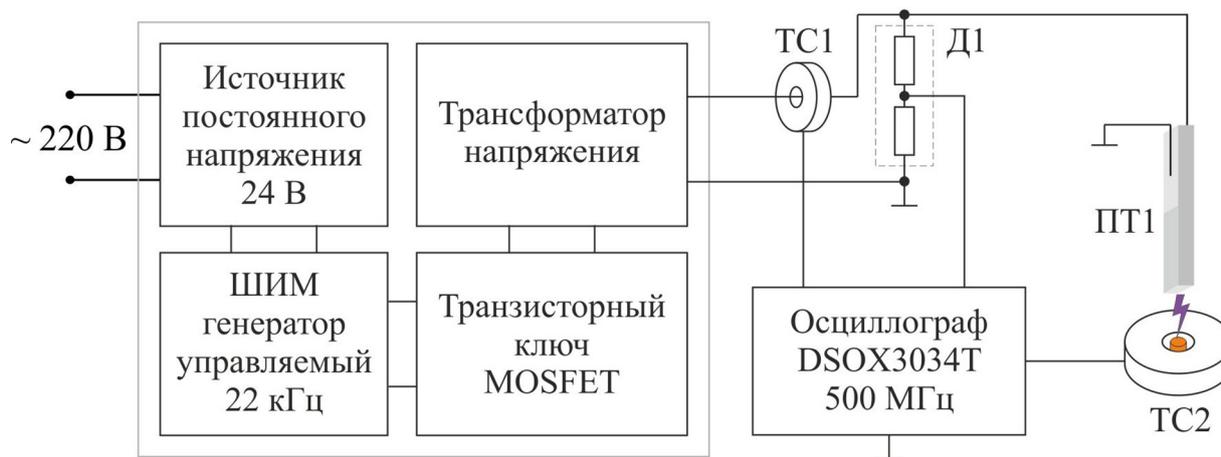


Рис. 2: Блок-схема источника питания и схемы измерения. ТС1 – токосъемник F-16M, ТС2 – токосъемник НТ-1000, Д1 – делитель напряжения 1:10, ПТ1 – пьезотрансформатор.

На рис. 3(а) показаны осциллограммы тока и напряжения на входе (низковольтной части) пьезотрансформатора при генерации искровых разрядов. Осциллограммы тока и напряжения имеют сложный вид из-за наличия в цепи индуктивностей, емкостей и резонансного режима работы пьезотрансформатора, но можно оценить активную мощность (за период колебаний) как (рис. 3(б)):

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} U_{\text{вх}}(t) I_{\text{вх}}(t) dt = 2.2 \text{ Вт},$$

где P – активная мощность, $U_{\text{вх}}(t)$ – напряжение на входе пьезотрансформатора, $I_{\text{вх}}(t)$ – ток на входе пьезотрансформатора, t – время, T – период колебаний, соответствующий рабочей частоте 22 кГц (≈ 45 мкс).

При генерации разрядов активная мощность (средняя за период) составляла 2.2 Вт. При отсутствии разрядов осциллограммы входных тока и напряжения были аналогич-

ны осциллограммам, показанным на рис. 3(а), но активная мощность не превышала 0.1 Вт.

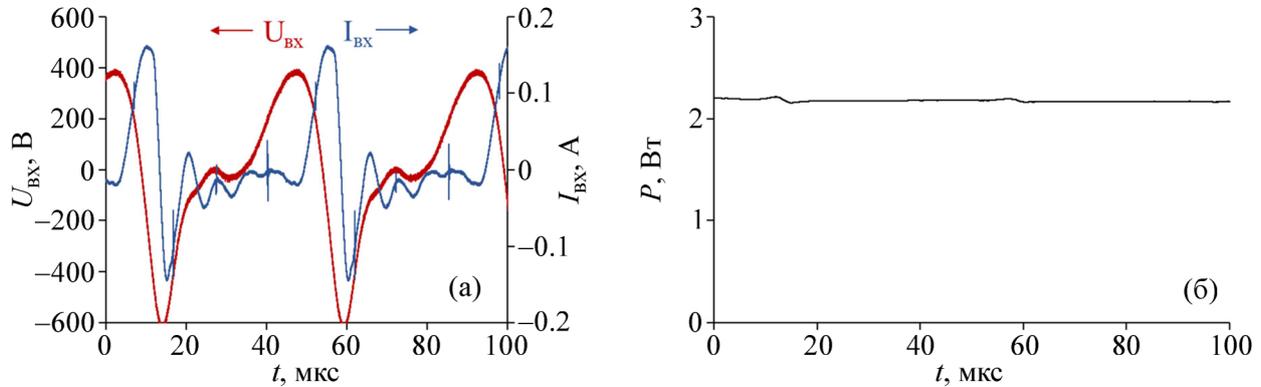


Рис. 3: (а) осциллограммы тока и напряжения на входе пьезотрансформатора при генерации искровых разрядов, (б) активная мощность за период колебаний (45 мкс).

Измерения тока искрового разряда проводились с помощью калиброванного токосъемника НТ-1000, предназначенного для измерения силы тока в диапазоне частот от 9 кГц до 1000 МГц, и осциллографа KEYSIGHT DSOX3034T 500 МГц. Выходной сигнал с данного токосъемника при проверочных измерениях переменного тока с частотой > 5 МГц был пропорционален току и соответствовал калибровке.

При измерениях тока искрового разряда измерительная щель токосъемника располагалась на середине воздушного зазора между пьезотрансформатором и металлическим цилиндром (рис. 4). Для обеспечения защиты измерительного оборудования от случайного пробоя на металлический корпус токосъемника была установлена полиэтиленовая трубка. На рис. 5(а) показаны импульсы тока периодически генерируемых искровых разрядов, на рис. 5(б) – один из импульсов тока, соответствующий средней амплитуде. За один период (45 мкс) генерировалось 4 искровых разряда. Отрицательные значения тока соответствуют току электронов с пьезотрансформатора на металлическую поверхность, а положительные значения – току в обратном направлении. Такое чередование разрядов связано с возбуждением в пьезотрансформаторе помимо основной моды 22 кГц еще и второй моды 44 кГц. Среднее пиковое значение амплитуды тока разрядов равно 0.34 А. Длительность импульсов тока практически не изменялась и составляла 20 нс. Соответственно, характерная частота изменения тока в импульсе около 50 МГц и выходной сигнал токосъемника был пропорционален току.



Рис. 4: Фотография эксперимента по измерению тока.

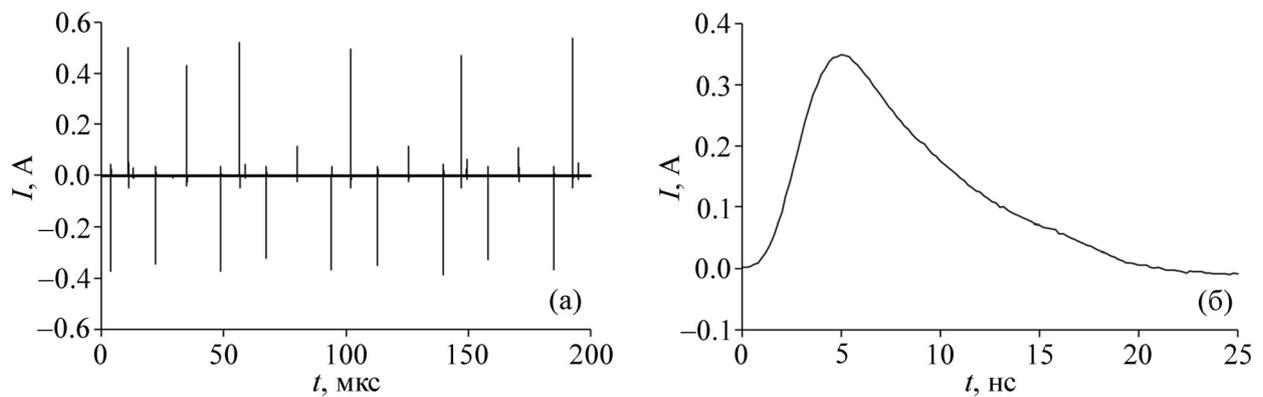


Рис. 5: Осциллограммы тока: (а) импульсы тока на большой временной развертке, (б) типичный импульс тока.

При разряде происходит зарядка металлического цилиндра, вследствие чего напряжение на воздушном зазоре уменьшается и ток прекращается. Таким образом, длительность тока ограничена емкостью металлического цилиндра. Корпус токосъемника может за счет своей емкости влиять на ток разряда. Емкость уединенного проводника в виде цилиндра можно рассчитать по приближенным формулам, представленным, например в [10, 11]. Для цилиндра высотой 12.3 мм и диаметром 8.6 мм она составляет ≈ 0.65 пФ. Оценка величины емкости системы “металлический цилиндр – корпус токосъемника” как емкость двух коаксиальных цилиндров дает значение ≈ 0.72 пФ. Следовательно, корпус токосъемника в условиях данного эксперимента не сильно искажает результат измерения тока.

Поскольку выходная часть пьезотрансформатора и металлический цилиндр представляют собой емкости под некоторым потенциалом, то изменение их потенциала связано с изменением заряда на этих емкостях:

$$U_{PT}(t) = U_{PT,0} - \frac{1}{C_{PT}} \int_0^t I(t) dt,$$

и

$$U_{Cyl}(t) = U_{Cyl,0} + \frac{1}{C_{Cyl}} \int_0^t I(t) dt,$$

где U_{PT} – потенциал высоковольтной части пьезотрансформатора, $U_{PT,0}$ – потенциал высоковольтной части пьезотрансформатора перед пробоем, C_{PT} – емкость высоковольтной части пьезотрансформатора, U_{Cyl} – потенциал металлического цилиндра, $U_{Cyl,0}$ – потенциал металлического цилиндра перед пробоем, C_{Cyl} – емкость металлического цилиндра, $I(t)$ – ток (рис. 5(б)).

Тогда напряжение на воздушном зазоре:

$$\Delta U(t) = U_{PT}(t) - U_{Cyl}(t) = \Delta U_0 - \frac{1}{C_{PT}} \int_0^t I(t) dt - \frac{1}{C_{Cyl}} \int_0^t I(t) dt,$$

$$\Delta U_0 = U_{PT,0} - U_{Cyl,0},$$

где ΔU – напряжение на воздушном зазоре, ΔU_0 – напряжение на воздушном зазоре перед пробоем.

Зная активную мощность (среднюю за период) и зависимость тока разряда от времени, можно построить зависимость напряжения на воздушном зазоре от времени. Как можно видеть из фотографий разряда (рис. 1) активные потери связаны как с искровым разрядом, так и с передачей потенциала на цилиндр меди с последующей разрядкой через диэлектрический барьерный разряд. Поэтому рассмотрим два случая – когда активные потери определяются только искровым разрядом, и когда кроме него еще присутствуют микроразряды (ДБР) у основания металлического цилиндра.

Уравнения для напряжения на воздушном зазоре между высоковольтной частью пьезотрансформатора и металлическим цилиндром, в первом случае примут вид:

$$\begin{cases} \Delta U(t) = \Delta U_0 - \frac{1}{C_{PT}} \int_0^t I(t) dt - \frac{1}{C_{Cyl}} \int_0^t I(t) dt, \\ \int_0^{\tau} \Delta U(t) I(t) dt = \frac{1}{4} PT. \end{cases}$$

При учете микроразрядов у основания, активная мощность тратится также и на зарядку металлического цилиндра с последующей разрядкой через микроразряды:

$$\begin{cases} \Delta U(t) = \Delta U_0 - \frac{1}{C_{PT}} \int_0^t I(t) dt - \frac{1}{C_{CY1}} \int_0^t I(t) dt, \\ \int_0^{\tau} \Delta U(t) I(t) dt = \frac{1}{4} PT - \frac{Q^2}{2C_{CY1}}, \end{cases}$$

где Q – заряд, передаваемый за импульс тока:

$$Q = \int_0^{\tau} I(t) dt = 2.9 \text{ нКл},$$

τ – длительность тока 20 нс.

На рис. 6 показаны рассчитанные зависимости напряжения на воздушном зазоре от времени. Как можно видеть из рис. 6, разность потенциалов между высоковольтным торцом пьезотрансформатора и металлическим цилиндром не опускается до нуля. Скорее всего, она соответствует пороговому значению приведенного поля. Полученные значения напряжения на воздушном зазоре можно рассматривать как максимально и минимально возможные. В реальности же искомая зависимость напряжения от времени находится где-то между этими двумя кривыми.

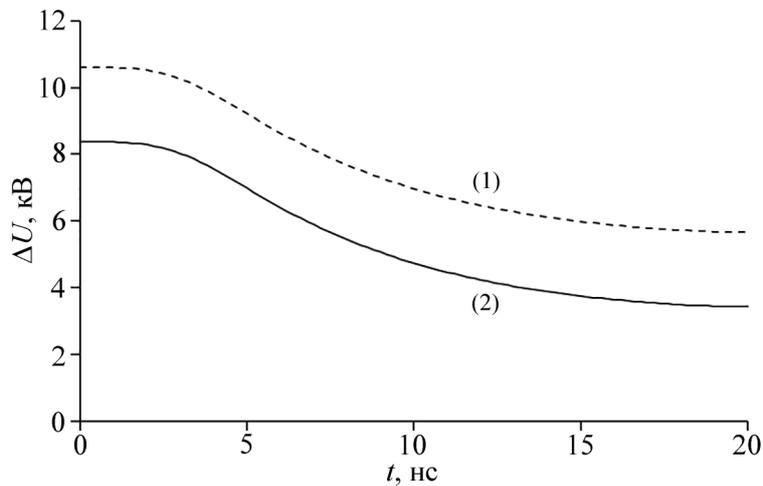


Рис. 6: Напряжение на воздушном зазоре. (1) вся активная мощность (средняя по периоду) выделяется в искровом канале; (2) активная мощность (средняя по периоду) тратится на выделяемую в искровом канале мощность и зарядку металлического цилиндра с последующей разрядкой через микроразряды.

Выводы. В работе измерен ток искровых разрядов, генерируемых в воздушном зазоре (3 мм) между пьезотрансформатором и металлическим цилиндром. Длительность тока разряда составляла ≈ 20 нс. Среднее пиковое значение тока разряда составляло 0.34 А. Энергия, выделяемая в одном разряде, составляла $(1.7 \dots 2.4) \cdot 10^{-5}$ Дж. Оценки напряжения на воздушном зазоре перед пробоем дают значения 8.4...10.6 кВ. По окончании искрового разряда напряжение составляет 3.4...5.7 кВ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. Korzec, F. Hoppenthaler, D. Burger, et al., Plasma Processes and Polymers, e2000053 (2020). DOI: 10.1002/ppap.202000053.
- [2] D. Korzec, F. Hoppenthaler, S. Nettesheim, Plasma **4**, 1 (2021). DOI: 10.3390/plasma4010001.
- [3] J. Stekke, C. Tendero, P. Tierce, et al., IEEE Transactions on Plasma Science **48**(5), 1264 (2020). DOI: 10.1109/TPS.2020.2985406.
- [4] M. Teschke, J. Engemann, Contrib. Plasma Phys. **49**(9), 614 (2009). DOI: 10.1002/ctpp.200910065.
- [5] E. M. Konchekov, N. G. Gusein-zade, L. V. Kolik, et al., IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **848**, 012037 (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/848/1/012037.
- [6] K. Artem'ev, L. Kolik, L. Podkovyrov, et al., IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science **390**, 012039 (2019). DOI: 10.1088/1755-1315/390/1/012039.
- [7] K. V. Artem'ev, N. N. Bogachev, N. G. Gusein-zade, et al., Russian Physics Journal **62**(11), 1 (2020). DOI: 10.1007/s11182-020-01948-1.
- [8] M. Keidar, Plasma Sources Sci. Technol. **24**, 033001 (2015). DOI: 10.1088/0963-0252/24/3/033001.
- [9] M. G. Kong, G. Kroesen, G. Morfill, et al., New Journal of Physics **11**, 115012 (2009). DOI: 10.1088/1367-2630/11/11/115012.
- [10] L. Verolino, Electrical Engineering **78**, 201 (1995). DOI: 10.1007/BF01240223.
- [11] G. Paffuti, Results for Capacitances and Forces in cylindrical systems. arXiv:1801.08202 [physics.class-ph]. DOI: 10.48550/arXiv.1801.08202.

Поступила в редакцию 7 марта 2024 г.

После доработки 30 мая 2024 г.

Принята к публикации 31 мая 2024 г.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 539.1.074.3

**ОПТИМИЗАЦИЯ МОНОЛИТНОГО
СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА
ДЛЯ ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННОГО ТОМОГРАФА**

М. В. Белов, М. В. Завертяев, В. А. Козлов, В. С. Цхай

Проведено моделирование и оценка разрешения монолитных позиционно чувствительных детекторов с различными поверхностями. Наилучший результат был получен при использовании комбинации грубой полировки поверхности кристалла и тефлоновой обертки с разрешением по глубине взаимодействия $dZ = 0.89 \pm 0.01$ мм. Наилучшее разрешение в плоскости $dX = 0.53 \pm 0.01$ мм было получено для тонко полированной пластины с ESR пленкой. Диффузный отражатель также демонстрирует повышение светосбора на 33% по сравнению с зеркальным.

Ключевые слова: сцинтилляционные кристаллы, гамма-излучение, позитронно-эмиссионная томография, искусственный интеллект, детекторы излучения.

Введение. Современные позитронно-эмиссионные томографы (далее ПЭТ) в качестве детекторов гамма-квантов используют сборки, состоящие из большого числа индивидуальных сцинтилляционных кристаллов, соединенных с многоканальными фотомножителями (далее ФЭУ). Пространственное разрешение таких детекторов ограничено физическими размерами кристаллов и ячеек ФЭУ. Альтернативой таким сборкам являются детекторы с монолитными сцинтилляционными пластинами. Монолитные кристаллы, соединенные с многоканальными ФЭУ, позволяют восстанавливать координаты в плоскости с высокой точностью, за счет возможности использования распределения сигналов от вспышек по каналам ФЭУ. Также такая конструкция позволяет восстанавливать координату по глубине взаимодействия. Кроме того, уменьшение числа рабочих элементов повышает надежность и понижает стоимость детекторного