
**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.384.62

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ**

© 2023 г. М. П. Калаев^а, А. В. Родина^а,
А. М. Телегин^{а,*}, Е. В. Исмаилова^а

^аСамарский национальный исследовательский университет имени акад. С.П. Королева
(Самарский университет)

Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

*e-mail: talex85@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.2023 г.

После доработки 18.03.2023 г.

Принята к публикации 29.05.2023 г.

Приведено описание датчика микрометеороидов и частиц космического мусора, основанного на регистрации отраженного и рассеянного лазерного излучения при прохождении частицы через оптический барьер. Предложена конструкция первичного преобразователя датчика, проведен теоретический анализ разрешающей способности, а также описание его схмотехнической реализации. Проведено моделирование с использованием метода трассировки лучей в специализированном программном обеспечении.

DOI: 10.31857/S0032816223060022, EDN: XVАНТВ

1. ВВЕДЕНИЕ

При измерении параметров пылевых частиц (микрометеороидов и микрочастиц космического мусора) используются как контактные, так и бесконтактные методы, основанные на различных физических принципах [1–3]. В зависимости от природы происхождения частиц их характеристики (диапазон размеров и скоростей, масса, электрический заряд, концентрация) могут существенно различаться. Типовые характеристики микрочастиц естественного (микрометеороиды, собственная внешняя атмосфера космического аппарата, планетарная пыль, например, на поверхности Луны, Марса) и искусственного происхождения (частицы космического мусора на околоземной орбите), которые нельзя контролировать с поверхности Земли радиолокационными и оптическими методами, имеют диаметр от 0.1 до 10 мкм и скорость от 1 до 70 км/с.

Аппаратные методы регистрации пылевых частиц можно разделить на две группы, которые приведены в табл. 1. При этом в зависимости от поставленной задачи могут различаться характеристики измеряемых потоков частиц: диапазон скоростей, масса, концентрация, размеры и элементный состав и размеры частиц.

Для измерения скорости пылевой частицы наибольшее распространение получил бескон-

тактный метод измерения, основанный на применении эффекта электростатической индукции [1, 3], суть которого заключается в наведении электрического потенциала на измерительный электрод при пролете заряженных микрочастиц. Недостатком данного метода являются помехи, которые наводятся на измерительном электроде от сторонних источников, поэтому поиск альтернативных методов и реализующих их систем бесконтактного измерения скорости микрометеороидов является актуальной научно-технической задачей.

В работе [4] приведен пример конструкции датчика для измерения скорости микрочастицы на основе лазера и фотодиода. При прохождении частицей лазерного луча происходит пропадание сигнала с фотодатчика. Однако данная конструкция ограничена тем, что может быть использована только в лабораторных условиях с ограниченным размером измерительного окна. Авторами предлагается модифицированный вариант метода и соответствующего конструктивного исполнения системы, существенно расширяющих практические сферы ее применения с учетом возможности увеличения точности измерения скорости микрочастиц.

Таблица 1. Аппаратные методы регистрации пылевых частиц

Методы, основанные на предварительном осаждении пыли	Методы без предварительного осаждения пыли
Весовой метод и приборы	Оптические методы: Коэффициент или сечение ослабления Безразмерный фактор эффективности ослабления Пространственное распределение рассеянного частицей света
Радиоизотопный метод и приборы	Абсорбционный метод (оптический)
Фотометрический метод	Метод интегрального светорассеяния
Люминесцентный метод	Приборы и методы счета частиц по интенсивности рассеянного света Голографический метод Индукционный метод и приборы Контактно-электрический метод и приборы Емкостный метод

2. МОДЕЛЬ РАССЕЯНИЯ НА МИКРОЧАСТИЦЕ

При облучении микрочастиц световым потоком наблюдаются эффекты, наглядно представленные на рис. 1 [5]. С точки зрения построения систем регистрации по изменению светового потока будем ориентироваться на рассеянное излучение. Анализируемые частицы могут быть двух типов: диэлектрические и проводящие. При этом могут существовать потери световой энергии за счет поглощения частицей: диэлектрические потери и потери за счет конечной проводимости проводящего материала. О наличии потерь в ча-

стицах говорит наличие мнимой части в показателе преломления материала частицы.

Для достаточно больших частиц, размеры которых соизмеримы с длиной волны, можно использовать для расчета теорию Ми. Рассеяние принято описывать безразмерными функциями, показывающими относительное угловое распределение интенсивности рассеянного света [6–9], индикатрисами $\xi(\theta, \varphi)$:

$$\xi(\theta, \varphi) = S_{\perp} S_{\perp}^* \sin^2(\varphi) + S_{\parallel} S_{\parallel}^* \cos^2(\varphi),$$

где $S_{\perp}$ и $S_{\parallel}$ – безразмерные комплексные амплитудные функции рассеяния для перпендикулярной и параллельной составляющих плоскости рассеяния. Общие выражения для $S_{\perp}$ и $S_{\parallel}$ в виде рядов были получены Ми:

$$\begin{aligned}
 S_{\perp} &= S_{\perp}(m, x, \theta) = \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n \cdot (n+1)} (a_n(m, x) \pi_n(\theta) + b_n(m, x) \tau_n(\theta)), \\
 S_{\parallel} &= S_{\parallel}(m, x, \theta) = \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n \cdot (n+1)} (b_n(m, x) \pi_n(\theta) + a_n(m, x) \tau_n(\theta)),
 \end{aligned}$$

где $m = \frac{n_1}{n_2}$ – относительный показатель преломления, n_1 – показатель преломления частицы, n_2 – показатель преломления среды, $x = k \cdot a = \frac{2\pi n_2}{\lambda} \cdot a$ – безразмерный параметр в теории Ми, a – радиус частицы, λ – длина волны светового потока, об-

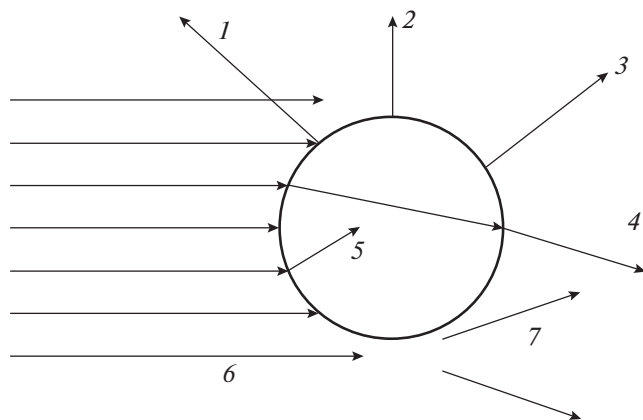


Рис. 1. Взаимодействие падающего светового луча с пылевой частицей: 1 – отражение, 2 – флуоресценция, 3 – рамановское рассеяние, 4 – преломление, 5 – поглощение, 6 – падающий световой пучок, 7 – дифракция.

лучающего частицу, функции π_n и τ_n вычисляются с использованием рекуррентных соотношений для полиномов Лежандра и их производных [9]:

$$\pi_n(\theta) = \cos(\theta) \frac{2n-1}{n-1} \pi_{n-1}(\theta) - \frac{n}{n-1} \pi_{n-2}(\theta),$$

$$\tau_n(\theta) = \cos(\theta) [\pi_n(\theta) - \pi_{n-2}(\theta)] - (2n-1) \sin^2(\theta) \pi_{n-1}(\theta) + \tau_{n-2}(\theta),$$

где

$$\pi_0(\theta) = 0, \quad \pi_1(\theta) = 1, \quad \pi_2(\theta) = 3 \cos(\theta),$$

$$\tau_0(\theta) = 0, \quad \tau_2(\theta) = \cos(\theta), \quad \tau_2(\theta) = 3 \cos(2\theta).$$

Формулы для расчета коэффициентов Ми a_n и b_n выглядят следующим образом:

$$a_n(m, x) = \frac{\left[\frac{A_n(mx)}{m} + \frac{n}{x} \right] \operatorname{Re}(\omega_n(x)) - \operatorname{Re}(\omega_{n-1}(x))}{\left[\frac{A_n(mx)}{m} + \frac{n}{x} \right] \omega_n(x) - \omega_{n-1}(x)},$$

$$b_n(m, x) = \frac{\left[m \cdot A_n(mx) + \frac{n}{x} \right] \operatorname{Re}(\omega_n(x)) - \operatorname{Re}(\omega_{n-1}(x))}{\left[m \cdot A_n(mx) + \frac{n}{x} \right] \omega_n(x) - \omega_{n-1}(x)},$$

где $A_n(mx)$ — множители, которые определяются через функции Бесселя комплексного аргумента, $\omega_n(x)$ — круговые функции, которые в данном случае имеют действительный аргумент и совпадают с функциями Рикатти–Бесселя [9]. Определим данные функции также с использованием рекуррентных соотношений:

$$\omega_n(x) = \frac{2n-1}{x} \omega_{n-1}(x) - \omega_{n-2}(x),$$

$$\omega_0(x) = \sin x - i \cos x,$$

$$\omega_{-1}(x) = \cos x - i \sin x,$$

$$A_n(mx) = -\frac{n}{y} + \left[\frac{n}{y} - A_{n-1}(mx) \right]^{-1},$$

$$A_0(mx) = \frac{\sin(p) \cos(q) + i \cdot \operatorname{sh}(q) \operatorname{ch}(q)}{\sin^2(p) + \operatorname{sh}^2(q)},$$

$$p = \operatorname{Re}(m) \cdot x, \quad q = \operatorname{Im}(m) \cdot x.$$

На рис. 2 представлены диаграммы рассеяния для проводящей и диэлектрической частиц. При малых значениях x диаграмма рассеяния начинает приближаться по форме к рэлеевскому рассеянию. Представленный на рис. 2 график показывает, что при малых размерах частицы, когда она не полностью перекрывает световой поток от источника излучения, существует часть излуче-

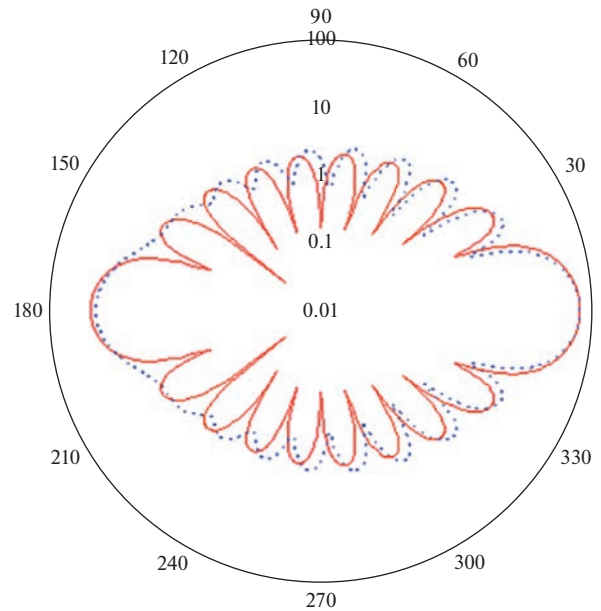


Рис. 2. Рассеяние в полярной системе координат для частицы, сделанной из железа (синяя линия) и из диэлектрического материала с $m = 5$ (красная линия) при $x = 100$.

ния, проходящая в прямом и боковом направлениях. Анализ же литературы [5–11] показал, что более эффективную систему измерения можно построить по принципу контроля не прямого, а бокового рассеяния.

3. ОПИСАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Был разработан датчик, регистрирующий момент пролета микрочастиц на основе анализа интенсивности рассеянного света. Прототип датчика выполнен с использованием 3D-печати из ABS-пластика в виде рамки с размерами окна для пролета микрочастиц $40 \times 50 \text{ мм}^2$ (рис. 3).

Детали конструкции датчика показаны на рис. 4. На поверхности рамы расположен полупроводниковый лазер с радиатором, мощностью 1 Вт и длиной волны 650 нм. Лазер снабжен объективом, формирующим световой пучок в виде расходящейся поверхности. При пролете частицы микронных размеров через лазерную плоскость происходит рассеяние света, в соответствии с теорией Ми. Рассеянный свет детектируется с помощью набора фотоприемников, расположенных на верхней поверхности рамки. Существенной проблемой при работе датчика является отражение лазерного излучения от элементов конструкции и, как следствие, засветка фотоприемников. Несмотря на то, что выделение короткого пролет-

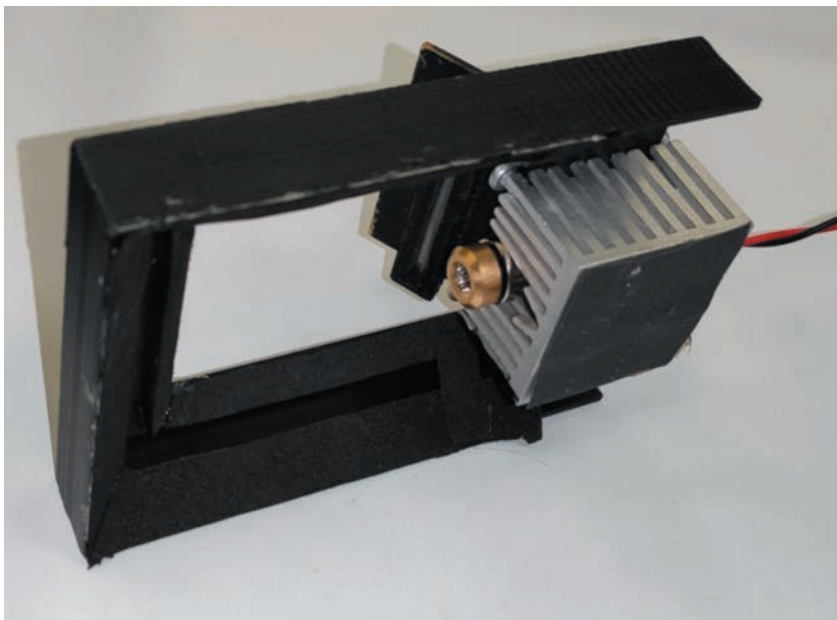


Рис. 3. Фотография макета датчика.

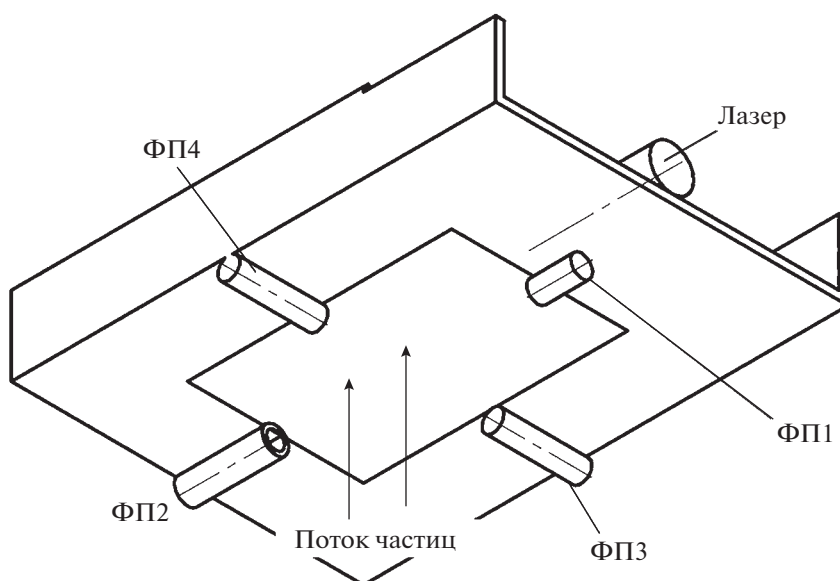


Рис. 4. Описание конструкции датчика: ФП1–ФП4 – фотоприемники.

Таблица 2. Характеристики лавинного фотодиода

Активная площадь, мм ²	0.196
Темновой ток, нА	0.5
Емкость, пФ	2.2
Коэффициент умножения	100
Быстродействие, ГГц	1
Спектральный диапазон, Нм	600–920
Квантовая эффективность, %	80
Чувствительность, А/Вт	50

ного импульса от постоянной фоновой засветки лазера легко реализуется с помощью усилителя с закрытым по постоянному току входом, при уровнях засветки, на несколько порядков превышающих полезный сигнал, фотоприемники могут перейти в область насыщения. По этой причине внутренняя поверхность пролетного окна представляет собой поглотитель лазерного излучения, выполненного в форме оптического лабиринта с узкой входной щелью. Сечение участка этого лабиринта показано на рис. 5. Наклонные

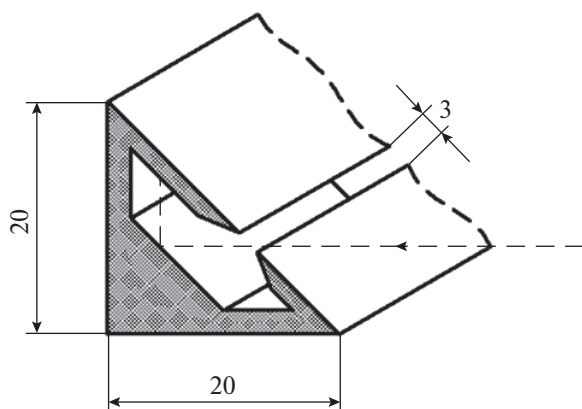


Рис. 5. Устройство оптического поглотителя лазерной плоскости.

плоскости и высокий коэффициент черноты поверхностей (равной 0.9) максимизирует поглощение излучения. Внешняя наклонная стенка поглотителя предназначена для поглощения лучей, находящихся за пределами колимированной плоскости лазера.

В датчике используются 4 лавинных фотодиода APD-500-8, размещенных по одному с каждой из сторон рамки, технические характеристики которых приведены в табл. 2.

Совместная обработка сигналов с четырех фотоприемников позволяет определить координаты пролета частицы, а также оценить ее размер. Ско-

рость частицы можно определить по длительности импульса сигнала. При толщине светового барьера в 1 мм, длительность импульса при пролете частицы со скоростью 10 км/с составляет 100 нс. Усилитель фотодиодов должен обеспечивать соответствующее быстродействие.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДАТЧИКА

Для определения области чувствительности датчика проведено моделирование трассировки лучей с использованием специализированного программного обеспечения (рис. 6).

Для моделирования использовалась пробная частица сферической формы диаметром 5 мкм, которая помещалась в узлах сетки с размерами $5 \times 10 \text{ мм}^2$. Материал поверхности частицы — Al_2O_3 (соответствует частицам, которые используются в электростатических ускорителях). Для каждого положения частицы оценивалась мощность излучения, регистрируемая каждым из четырех фотоприемников. По результатам моделирования построены графики для каждого из фотоприемников (рис. 7), а также график суммарной области чувствительности (рис. 8) (мощность оптического сигнала в 0.2–4 нВт).

Анализ результатов моделирования показал, что оптическая мощность, принимаемая фотоприемниками при пролете частицы диаметром 5 мкм, со-

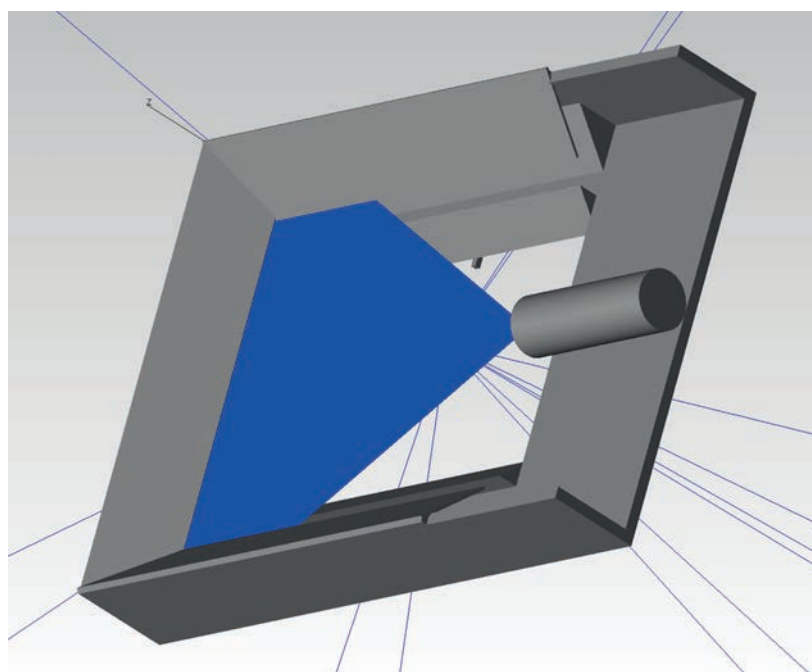


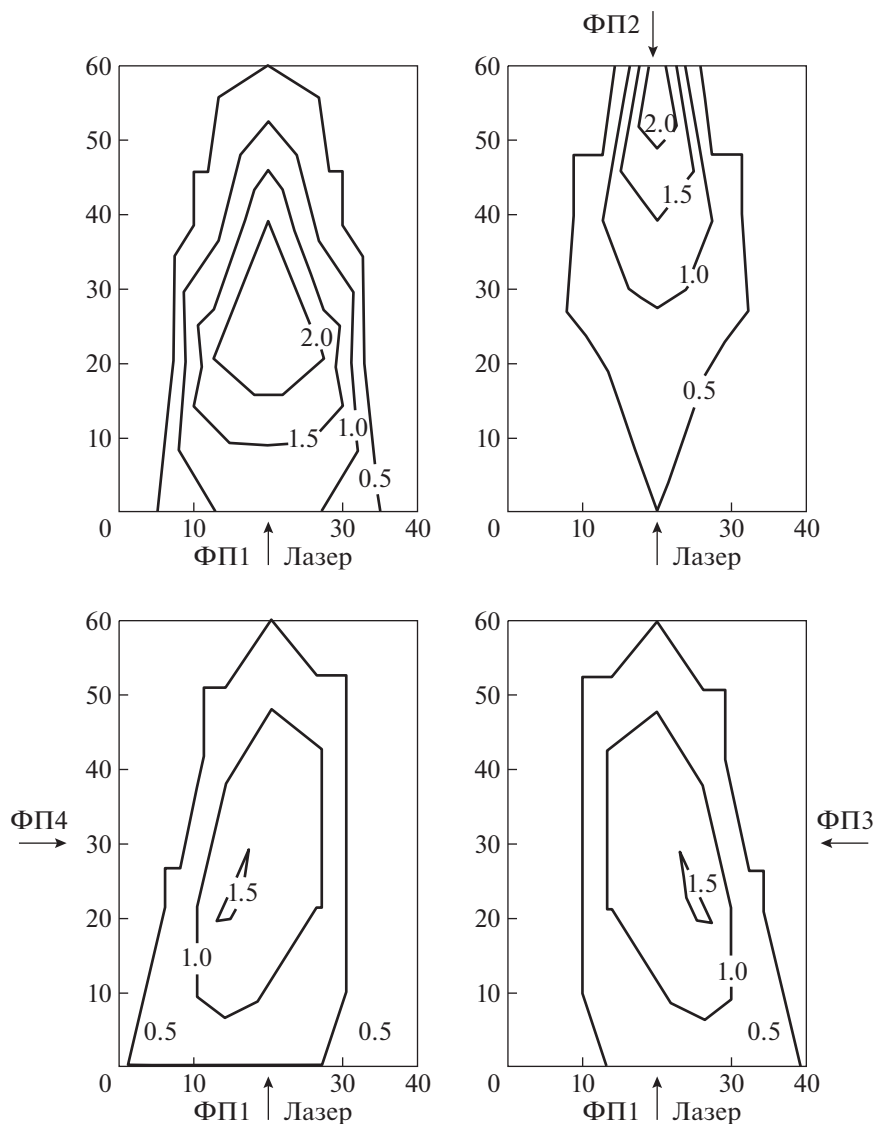
Рис. 6. 3D-модель датчика.

Таблица 3. Характеристики лавинного фотодиода

Активная площадь, мм ²	0.196
Темновой ток, нА	0.5
Емкость, пФ	2.2
Коэффициент умножения	100
Быстродействие, ГГц	1
Спектральный диапазон, Нм	600–920
Квантовая эффективность, %	80
Чувствительность, А/Вт	50

ставляет от 0.2 до 2 нВт. Соотношение сигнал/шум фотоприемника (SNR) с учетом его характеристик (табл. 3) в данном случае составляет от 20 до 200, что достаточно для надежной регистрации частицы. Зона максимальной чувствительности датчика составляет 20×30 мм² в центре пролетного окна.

Серьезной задачей для построения оптического датчика микрочастиц является создание усилителя фототока, обладающего одновременно высоким усилением, высоким быстродействием и низким уровнем собственных шумов. Схема использованного усилителя показана на рис. 9. Усилитель содержит 2 каскада: первый каскад выполнен по схеме трансимпедансного усилителя на основе микросхемы DA₁ (LTC6268-10), второй

**Рис. 7.** Мощность (в нановаттах) оптического сигнала на входном окне фотоприемников.

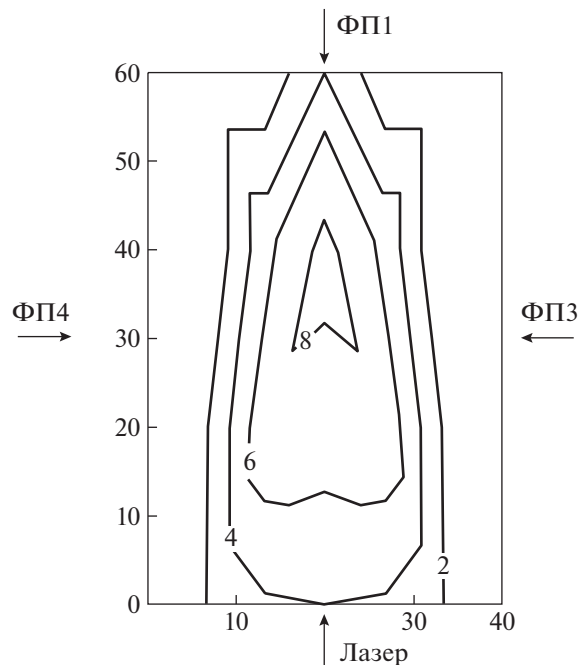


Рис. 8. Мощность (в нановаттах) оптического сигнала на входном окне фотоприемников.

каскад представляет собой логарифмический усилитель на микросхеме DA_2 (AD8307). Граничная частота составляет 11 МГц.

Испытания датчика проводились на электростатическом ускорителе [12]. Типовой сигнал на экране осциллографа, подключенного к выходу усилителя первого канала, показан на рис. 10.

Использование датчика позволило повысить количество регистрируемых частиц в электростатическом ускорителе за счет возможности обнаружения частиц с малыми зарядами и скоростями, которые практически невозможно обнаружить с помощью стандартно используемых для

этих целей датчиков на основе индукционных датчиков типа колец Фарадея [1, 12]. Кроме того, после проведения модернизации и калибровки датчика предполагается возможность обнаружения координат пролета частиц, что является важным для определения области фокусировки и распределения частиц в поперечном сечении тракта ускорителя.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный прототип оптического датчика для регистрации высокоскоростных пылевых частиц позволяет регистрировать микрочастицы с

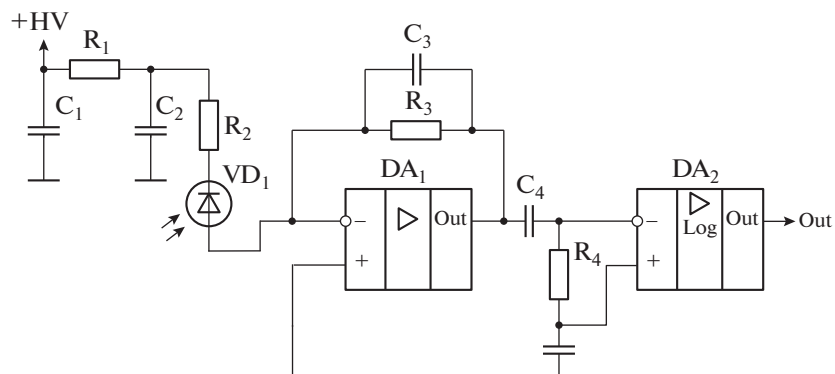


Рис. 9. Схема усилителя для лавинного фотодиода (вспомогательные цепи не показаны).

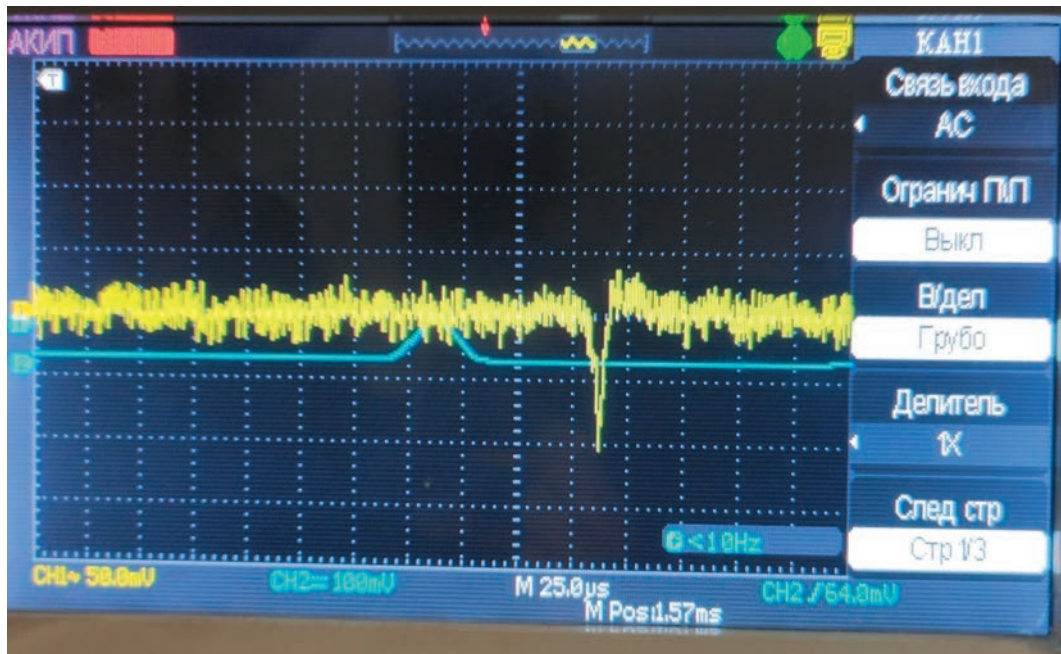


Рис. 10. Сигнал на выходе датчика: голубым цветом показан сигнал на выходе кольца Фарадея, регистрирующего момент пролета заряженной микрочастицы и размещенного на выходе ускорительного тракта, желтым — суммарный сигнал с фотодатчиков.

размерами 1–50 мкм и скоростями 0.1–10000 м/с. Преимуществами датчика является высокая информативность и возможность работы с низкоскоростными частицами по сравнению с датчиками на основе колец Фарадея. Использование оптического метода измерения позволило устранить влияние паразитных электромагнитных помех, возникающих в ускорителе высокоскоростных микрочастиц в процессе его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов К.Е., Григорьев Д.П., Телегин А.М. // Успехи прикладной физики. 2021. V. 9. № 3. P. 245. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-3-245-265>
2. Kalaev M.P., Telegin A.M., Voronov K.E., Lixiang J., Jilong J. // Computer Opt. 2019. V. 43. Iss. 5. P. 803. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-5-803-809>
3. Auer S., Grün E., Srama R., Kemp S., Auera R. // Planetary and Space Science. 2002. V. 50. P. 773. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(02\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(02)00019-3)
4. José M. Sánchez-Pena, Marcos C., María Y. Fernández, Zaera R. // Opt. Engineering. 2007. V. 46. Iss. 5. Art. № 051014. <https://doi.org/10.1117/1.2740771>
5. Glasse B., Zerwas A., Guardani R., Fritsching U. // Meas. Sci. Technol. 2014. V. 25. Art. № 035205. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/3/035205>
6. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: John Wiley & Sons, 1983. P. 533. (Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. P. 664.)
7. Van de Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. London: John Wiley and Sons, Inc.; Chapman and Hall, Ltd., 1957. (Ван де Хюлст. Г. Рассеяние света малыми частицами, М.: Издательство иностранной литературы, 1961.)
8. Сапронов М.В., Скорнякова Н.М. Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон". 2019. P. 99.
9. Deirmendjian D. Electromagnetic scattering on spherical polydispersions. New York: American Elsevier publishing company, Inc., 1969. P. 318. (Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / Пер. с англ. под ред. К.Н. Кондратьева. М.: Мир, 1971. С. 165.)
10. Weiner M. Rust, Donnelly T.D. // Am. J. Phys. 2001. V. 69. Iss. 2. P. 129. <https://doi.org/10.1119/1.1311785>
11. Peltoniemi J., Zubko N., Virkki A., Gritsevich M., Moilanen J., Roulet J., Nguyen D., Mitev V., Putzar R., Watson E., Schimmerohn M., Penttilä A., Muinonen K., Millinger M. // Adv. Space Research. 2022. V. 70. P. 2961. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.09.022>
12. Телегин А.М., Пияков А.В. // ПТЭ. 2017. № 6. P. 101. <https://doi.org/10.1134/S0020441217060100>