

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

УДК 535.317

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ
ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО
ДАТЧИКА ИСКРЫ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ¹**

© 2023 г. И. М. Плешанов^{a,*}, А. О. Белорус^b

^aУниверситет точной механики и оптики (ИТМО)

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49

^bСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ленина (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

*e-mail: impleshanov@itmo.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 29.04.2023 г.

Рассмотрена принципиальная схема позиционно-чувствительных люминесцентных датчиков искры со спектральным преобразователем излучения. Датчик позволяет детектировать электрическую искру по одной или двум координатам в пространстве в зависимости от расположения торцов оптических волокон. Проведены численное моделирование и оптимизация оптических систем позиционно-чувствительных люминесцентных датчиков искры. Рассчитаны эффективность и разрешение оптической системы.

DOI: 10.31857/S003281622305021X, EDN: ZVBHSQ

ВВЕДЕНИЕ

Для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с образованием электрической искры, существует потребность в датчиках, которые способны детектировать искру и вовремя предупреждать о возможности возникновения чрезвычайных ситуаций. Своевременная регистрация электрического искрения может позволить предотвратить возникновение аварийных ситуаций на различных объектах. Причинами возникновения пожароопасных ситуаций являются искрение электропроводки, короткое замыкание, появление искр в результате трения и т. д. Для регистрации электрического искрения могут применяться оптические датчики. Оптические датчики обладают такими характеристиками, как надежность, быстродействие, высокая чувствительность. Преимуществами оптических датчиков являются их невосприимчивость к электромагнитным помехам и способность работы в агрессивных средах. Данное преимущество создается за счет того, что электрическая часть оптического датчика может быть расположена за пределами агрессивных сред и высоких

электромагнитных полей. Существует оптический метод регистрации искры, который позволяет использовать диэлектрические материалы в оптической схеме датчика. Такие датчики могут применяться для обеспечения безопасности в промышленности, нефтедобывающих отраслях, технике, использующей различные электрические устройства большой мощности, и в установках с высокими напряжениями.

Регистрация электрической искры в пространстве с помощью оптического метода осуществляется захватом излучения от искры оптическим или оптоэлектронным устройством. Спектр излучения электрической искры находится в основном в ультрафиолетовой (УФ) и коротковолновой областях в диапазоне 300–450 нм. Излучение искры, создаваемое между контактами на основе железа, находится в спектральном диапазоне 300–450 нм, между контактами на основе алюминия в диапазоне 300–400 нм, между контактами на основе меди – 325–350 нм [1].

Ранее было предложено несколько вариантов оптических датчиков для регистрации искры в пространстве. Некоторые оптоволоконные датчики для обнаружения электрических разрядов основаны на захвате излучения полимерным волноком [2, 3]. Такие датчики обладают высокими

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

оптическими потерями и низкой чувствительностью. В работах [4–7] рассмотрены датчики с использованием цилиндрической линзы. Такие датчики способны определять пространственное положение искры по одной координате. Преимуществами предлагаемого в работе технического решения являются точное пространственное определение искры по двум или трем координатам (за счет использования пары датчиков) и высокий уровень чувствительности по сравнению с аналогами [8].

Целями данной работы являются выбор и оптимизация оптической фокусирующей части позиционно-чувствительных люминесцентных искровых датчиков. При выборе оптических систем мы обращали внимание на такие характеристики, как радиус пятна рассеяния, расстояние от оптической системы до преобразователя излучения, размер оптической системы и эффективность сбора излучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ

Численное моделирование проводилось с помощью программного обеспечения Zemax. В качестве материала тонкой линзы использовалось стекло N-BK7 с показателем преломления 1.51. В оптической системе из трех линз использовались стекла SK16 с показателем преломления 1.62 и F2 с показателем преломления 1.61. В оптической системе из четырех линз материалы стекла SK4 имеют показатель преломления 1.61, BAF4 – показатель преломления 1.605 и KF9 – показатель преломления 1.52. Моделирование и оптимизация проводились на длине волны 365 нм.

Понятие углового разрешения относится к вычислению минимального угла между точками, которые может различать оптическая система. Расчет проводился по критерию Рэля. Под пятном рассеяния понимается искаженное изображение точки, образованное реальной оптической системой, возникающее в результате дифракции света. Диаметр пятна рассеяния определялся по максимальному значению поперечной аберрации. Эффективность ввода излучения в оптическое волокно рассчитывалась по приведенным ниже формулам (1) и (2):

$$\eta = NA^2 \quad (1)$$

при условии, что радиус сердцевины оптического волокна больше радиуса источника (пятна рассеяния), здесь η – эффективность ввода оптического излучения в волокно, NA – апертура оптического волокна. Также

$$\eta = \left(\frac{R}{r_s}\right)^2 \cdot NA^2 \quad (2)$$

при условии, что радиус сердцевины оптического волокна меньше радиуса источника, здесь R – радиус сердцевины оптического волокна, r_s – радиус источника излучения (пятна рассеяния).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Электрическую искру можно рассматривать как точечный источник света, который излучает в УФ- и коротковолновой областях спектра в диапазоне 300–450 нм. На рис. 1 показаны принципиальная схема датчика искры и ход лучей от искры 1 [9]. Задачей объектива или линзы 2 является фокусирование части излучения от искры на пластине из флуоресцентного стекла или полимера 3 (преобразователь излучения) в виде малого пятна. Излучение от искры, которое локально попадает на преобразователь излучения, возбуждает в преобразователе люминесценцию, которая, в свою очередь, определяется в длинноволновой области видимого спектра [10–15]. Основная часть излучения люминесценции попадает на торцы оптических волокон или волоконных жгутов 4. Далее с помощью волокон излучение люминесценции попадает на фотоприемник 5, преобразующий оптический сигнал в электрический. Оптические жгуты или волокна могут располагаться в ряд или в виде двумерной матрицы, как показано на рис. 1 а, б. Такое использование упорядоченного расположения оптических волокон или волоконных жгутов позволяет детектировать местоположение электрической искры по одной или двум координатам. Для исключения попадания на фотоприемник солнечного излучения, излучения от ламп и т. д. используется светофильтр 6, прозрачный в УФ- и коротковолновой областях спектра, который расположен перед объективом или линзой. Преобразователь излучения применяется для уменьшения стоимостных характеристик датчика искрения за счет использования дешевых кремниевых фотоприемников, чувствительность которых определяется в длинноволновой области видимого спектра, а также для увеличения его чувствительности за счет уменьшения затухания в оптических волокнах и согласования длины волны максимальной чувствительности фотоприемника с длиной волны минимального затухания в оптическом волокне.

Люминесценция возбуждается в месте расположения фокального пятна, которое соответствует положению электрической искры в пространстве. Каждому оптическому волокну и фотодиоду, закрепленному за ними, присваивается номер. Таким образом, номер фотодиода, который зарегистрировал сигнал, соответствует координатам положения электрической искры в пространстве.

Для решения задачи фокусировки излучения на преобразователе были смоделированы и оптимизированы две оптические системы и тонкая

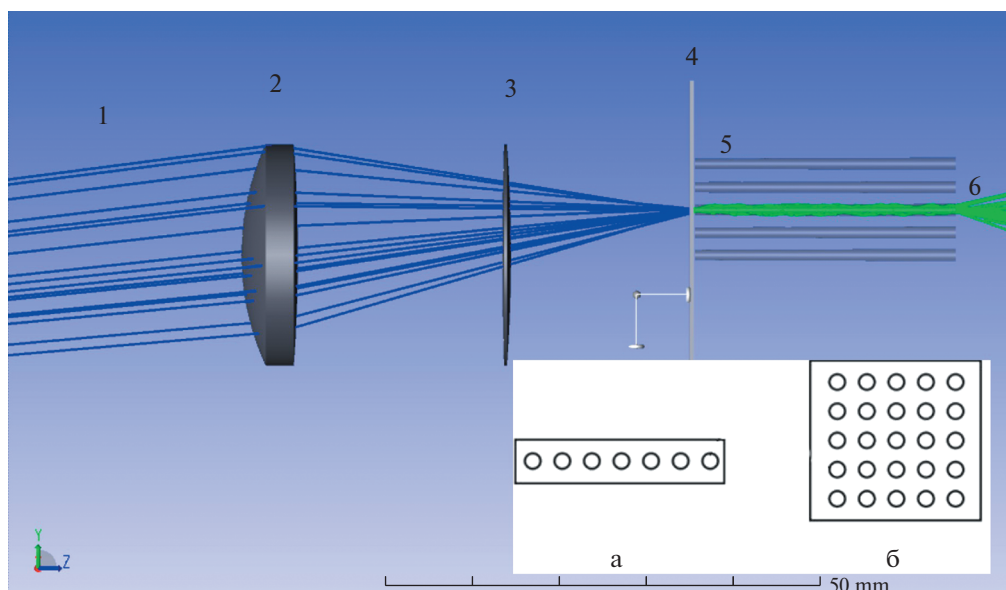


Рис. 1. Схема датчика искры: 1 – ход лучей от электрической искры, 2 – линза или объектив, 3 – оптический УФ-фильтр, 4 – пластина из флуоресцентного стекла или полимерной пленки, 5 – передающие оптические волокна или волоконные жгуты, 6 – расположение фотоприемников матричным или линейным рядом. Возможные варианты расположения входных концов передающих оптических волокон или пучков волокон: а) линейное расположение, б) расположение в виде двумерной матрицы.

линза. Расстояние от точечного источника до оптической системы 500 мм, углы падения на оптическую систему от 0 до 12° . Моделирование проводилось для длины волны излучения 365 нм. Расстояние от линзы до преобразователя излучения оптимизировалось таким образом, чтобы геометрический радиус пятна рассеяния имел один порядок и не выходил за пределы диаметра оптических волокон при изменении угла падения.

Фокусное расстояние используемой тонкой линзы 48.20 мм. Изначально система с тонкой линзой имела расстояние от линзы до преобразователя излучения 48.28 мм. После оптимизации расстояние от объектива до преобразователя излучения стало равным 45.65 мм. Угловое разрешение для этой схемы составляет 0.5° . На рис. 2 представлена схема применения сферического расположения оптических волокон в системе с тонкой линзой. Сферическое расположение оптических волокон добавлено для улучшения углового разрешения в схеме с тонкими линзами. Оптимизированы такие параметры, как расстояние до спектрального преобразователя и радиус кривизны детектирующей поверхности. Расстояние до спектрального преобразователя 47.80 мм, радиус кривизны 17.69 мм. Угловое разрешение для этой схемы составило 0.3° . На рис. 3, 4 приведены диаграммы пятна рассеяния при различных углах падения. Видно, что пятно рассеяния меняет свою форму с увеличением угла падения. На рисунках видно, что пятна рассеяния тонкой линзы

при сферическом расположении оптических волокон имеют меньший радиус. При углах падения 6° они сохраняют более овальную форму.

В табл. 1 приведены геометрические радиусы пятна рассеяния для тонкой линзы и для тонкой линзы со сферическим расположением волокон с диапазоном углов $\pm 12^\circ$. Из данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что с увеличением угла падения увеличивается геометрический радиус пятна рассеяния. Сферическое расположение оптических волокон или волоконных жгутов улучшает пространственные характеристики и позволяет использовать волокна меньшего диаметра за счет уменьшения пятна рассеяния в 2 раза. Однако это усложняет конструкцию не-

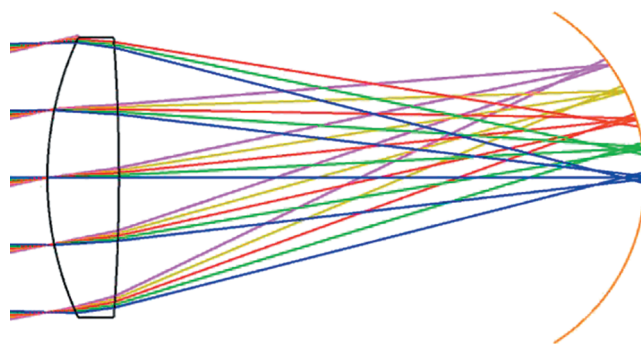


Рис. 2. Схема с тонкой линзой с использованием сферического расположения оптических волокон или жгутов волокон.

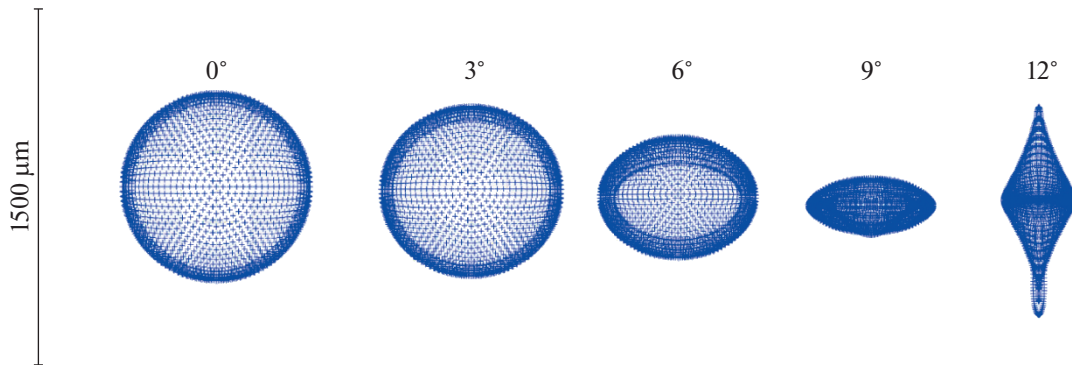


Рис. 3. Диаграммы пятна рассеяния тонкой линзы при разных углах падения.

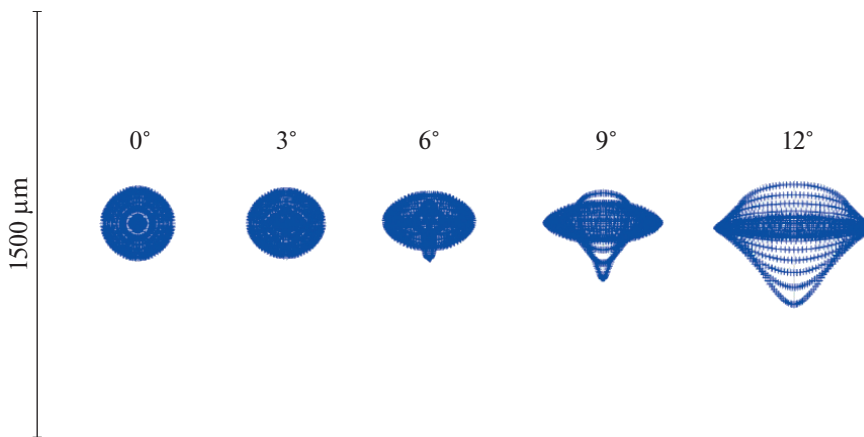


Рис. 4. Диаграммы пятна рассеяния тонкой линзы с использованием сферического расположения оптических волокон при разных углах падения.

обходимостью выполнить преобразователь излучения в сферической форме, либо нанести пленки люминофоров на торцы оптических волокон, что, в свою очередь, является технологически сложным процессом. Из анализа данных табл. 1 следует, что для определения искры в диапазоне

Таблица 1. Геометрические радиусы пятна рассеяния для тонкой линзы в диапазоне углов $\pm 12^\circ$

Угол падения	Геометрический радиус пятна рассеяния для тонкой линзы, мкм	Геометрический радиус пятна рассеяния тонкой линзы со сферическим расположением оптических волокон или жгутов волокон, мкм
0°	390.1	121.9
3°	378.3	130.7
6°	327.4	155.4
9°	249.2	205.6
12°	470.9	276.1

$\pm 12^\circ$ можно использовать оптические волокна с диаметром сердцевины от 550 мкм до 1000 мкм. На рис. 5, 6 представлены графики долей падающего излучения от геометрического радиуса пятна рассеяния при использовании тонкой линзы и тонкой линзы со сферическим расположением оптических волокон. Представленные ниже данные определяют долю падающего излучения на торец волокна или волоконного жгута по отношению к геометрическому радиусу пятна. С помощью таких характеристик возможно качественно оценить необходимый диаметр сердцевины передающих оптических волокон. При использовании тонкой линзы оптимальные диаметры оптического волокна находятся в диапазоне 498–940 мкм. При использовании тонкой линзы со сферическим расположением оптических волокон или жгутов оптимальный диаметр находится в диапазоне 242–550 мкм. Следует учитывать, что эффективность преобразования объемной волны в волноводную моду зависит от числовой апертуры и не может быть больше 30%.

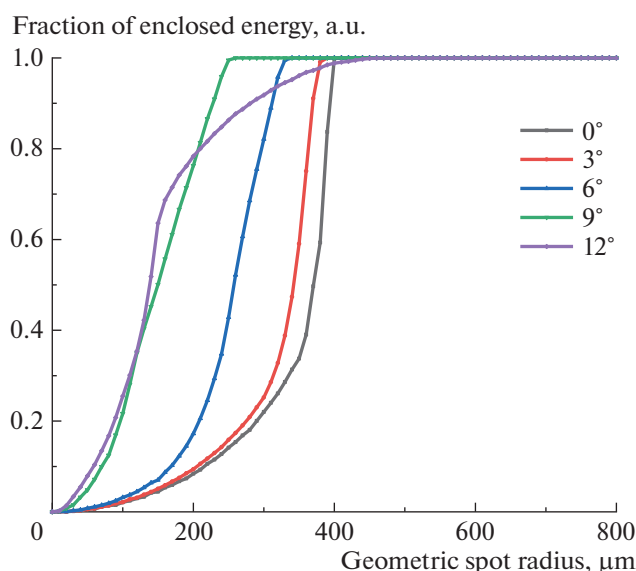


Рис. 5. Доля падающего излучения в зависимости от геометрического радиуса пятна рассеяния для тонкой линзы при разных углах падения.

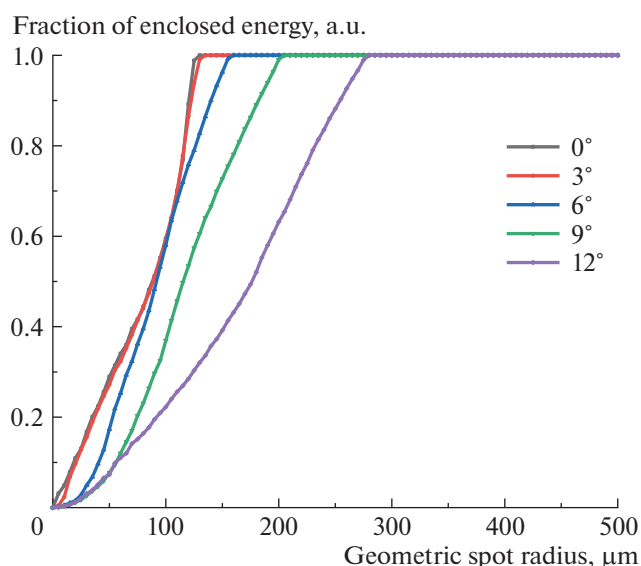


Рис. 6. Доля падающего излучения в зависимости от геометрического радиуса пятна рассеяния для тонкой линзы со сферическим расположением оптических волокон или волоконных жгутов при различных углах падения.

Для эффективного ввода преобразованного излучения лучше всего использовать оптические волокна с заданными оптимальными диаметрами сердцевин, соответствующие максимумам диаметра пятна рассеяния и большими числовыми апертурами. В качестве оптического волокна для объектива можно использовать пластиковое оптическое волокно (POF). В качестве оптического волокна для объектива со сферическим расположением оптических волокон можно использовать волокно с сердцевинной из кварцевого стекла и полимерной оболочкой (HCS). Основные параметры и эффективность ввода излучения в оптическое волокно представлены в табл. 2. Оптические волокна POF имеют большие значения затухания сигнала по сравнению с HCS-волоконном, что, в свою очередь, позволяет использовать их для передачи сигнала на расстояния до 200 м.

Математическое моделирование системы из трех и четырех линз проводилось в диапазоне углов падения $\pm 12^\circ$ для длины волны излучения 365 нм. Расстояние от источника до оптической системы 500 мм. На рис. 7 показаны конструкции системы с тремя линзами и системы с четырьмя линзами. Система из трех линз имеет фокусное расстояние 58 мм, размер системы 17 мм, расстояние до преобразователя излучения 59.1 мм, геометрический радиус пятна рассеяния 83.5 мкм. Система из четырех линз имеет фокусное расстояние 101 мм, размер системы 19 мм, расстояние до преобразователя излучения 121 мм, геометрический радиус пятна рассеяния 111.2 мкм.

Для достижения наилучшего показателя пространственного разрешения искрового датчика

оптимизировано расстояние от линзы до спектрального преобразователя, как и в случае тонкой линзы. Расстояние от объектива до спектрального преобразователя с системой из трех линз равно 59.3 мм, с системой из четырех линз равно 120.9 мм. На рис. 8, 9 приведены диаграммы пятна рассеяния линзовых систем при различных углах падения. В табл. 3 приведен геометрический радиус пятна рассеяния в диапазоне углов $\pm 12^\circ$ для системы из трех и четырех линз. Результаты показывают, что при изменении угла падения геометрический радиус пятна рассеяния увеличивается постепенно, и он не претерпевает скачкообразных изменений. Угловое разрешение для трехлинзовой оптической системы составляет 0.125° , для четырехлинзовой системы – 0.1° .

При использовании трех- и четырехлинзовых систем оптимальные диаметры волокон находятся в диапазонах 154–237 мкм и 223–300 мкм соответственно. В качестве оптического волокна для трех- и четырехлинзовых систем могут быть использованы волокна с сердцевинной из кварцевого

Таблица 2. Основные параметры оптических волокон

Параметры	POF	HCS
Диаметр волокна, мкм (сердцевина/оболочка)	980/1000	600/625
Числовая апертура, N.A.	0.500	0.4500
Эффективность ввода излучения	0.2500	0.2025

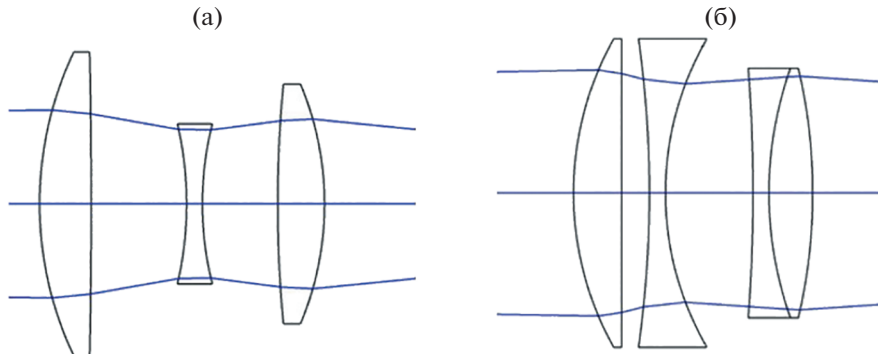


Рис. 7. Объективы оптических систем: а – с тремя линзами, б – с четырьмя линзами.

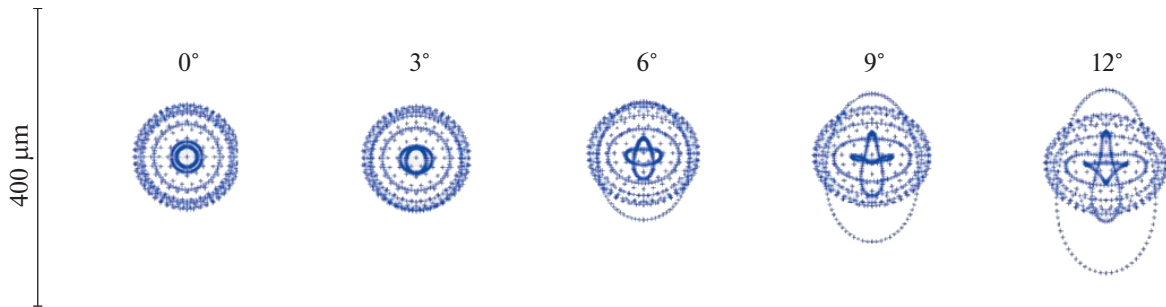


Рис. 8. Диаграммы пятна рассеяния системы с тремя линзами под разными углами падения.

стекла и полимерной оболочкой НСS диаметром 400/425, числовой апертурой 0.45 и эффективностью ввода излучения в оптическое волокно 0.2025. На рис. 10 представлены графики зависимости доли падающего излучения от геометрического радиуса пятна рассеяния системы из трех и четырех линз. Расчеты показывают, что диаметр пятна рассеяния меняется в небольших пределах при всех углах падения.

Эффективность сбора излучения (η) рассчитывалась для каждой из рассматриваемых линзовых систем. В табл. 4 показаны данные углового разрешения и эффективности сбора света для всех смоделированных систем. Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что

использование системы линз приводит к улучшению углового разрешения оптической системы датчика. Использование сферического расположения оптических волокон или волоконных жгутов позволяет улучшить характеристики углового разрешения оптической системы датчика, как это показано на примере с тонкой линзой. Также представленные результаты дают возможность оценить эффективность сбора света для каждой оптической системы. Все моделированные в работе оптические системы имеют эффективность сбора света более 80%. Линза и линза со сферическим расположением оптических волокон имеют наилучшие характеристики по данному показателю. Оптическая система из трех линз наиболее

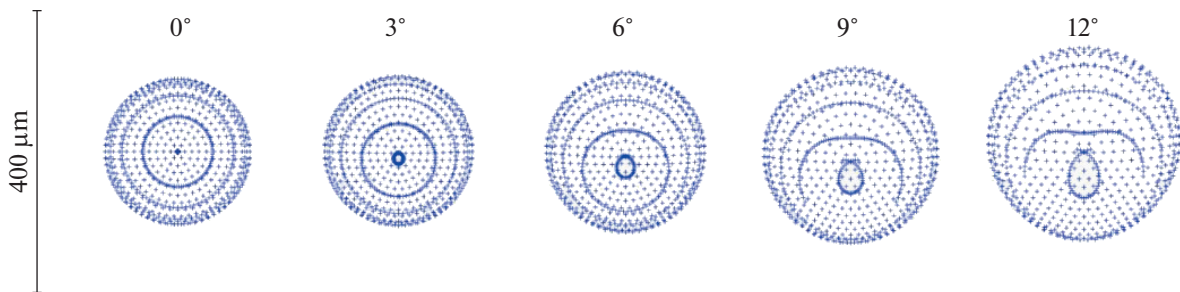


Рис. 9. Диаграммы пятна рассеяния системы с четырьмя линзами под разными углами падения.

Таблица 3. Геометрические радиусы пятна рассеяния в диапазоне углов $\pm 12^\circ$

Угол падения	Геометрический радиус пятна рассеяния системы из трех линз, мкм	Геометрический радиус пятна рассеяния системы из четырех линз, мкм
0°	76.5	111.3
3°	86.2	124.1
6°	97.5	128.1
9°	113.6	141.3
12°	91.4	150.4

удобна для использования при реализации позиционно-чувствительного искрового датчика, поскольку она компактна, имеет меньший геометрический радиус пятна рассеяния для всех исследованных углов падения и имеет более низкое угловое разрешение, при этом обладает хорошим показателем эффективности сбора излучения. Трехлинзовая система больше подходит для меньшего диаметра торцов оптических волокон. Четырехлинзовая система может использоваться для торцов волокон большего диаметра, она имеет хороший показатель η , но более высокое угловое расширение. Система с тремя линзами имеет меньшее расстояние от линзы до преобразователя излучения, чем система с четырьмя линзами. Это способствует более компактной конструкции датчика искры. Линза и линза со сферическим расположением оптических волокон или волоконных жгутов могут использоваться для торцов волокон с еще большими диаметрами. Эффективность сбора излучения имеет одинаковое зна-

чение, а угловое разрешение линзы со сферическим расположением оптических волокон или волоконных жгутов на 0.2° меньше, что дает этому решению преимущество.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена принципиальная схема позиционно-чувствительного люминесцентного датчика искры со спектральным преобразованием излучения. Использование сферического расположения оптических волокон или волоконных жгутов позволяет уменьшить геометрический радиус пятна рассеяния для всех рассматриваемых углов падения в несколько раз, что дает возможность использовать оптические волокна или жгуты меньшего диаметра и улучшать угловое разрешение датчика. Наибольший радиус пятна рассеяния наблюдается при угле падения 12° , он составляет 470.9 мкм для тонкой линзы и 276.1 мкм для тонкой линзы при сферическом расположении оптических волокон или волоконных жгутов. Показатели эффективности сбора излучения этих систем близки к 96.4% и выше при разных углах падения. Эффективность ввода излучения при этих характеристиках составляет 0.2500 для POF-волокна и 0.2025 для HCS-волокна. Оптическая система с четырьмя линзами имеет хорошие характеристики для использования ее в реализации позиционно-чувствительных датчиков искры. Радиусы геометрических пятен рассеяния при всех рассмотренных углах падения изменяются в диапазоне от 111 до 150 мкм, что является лучшим показателем по сравнению с тонкой линзой. Угловое разрешение четырехлинзовой системы составляет 0.125° . Показатели эффективности сбора света являются наименьшими из рассмотренных

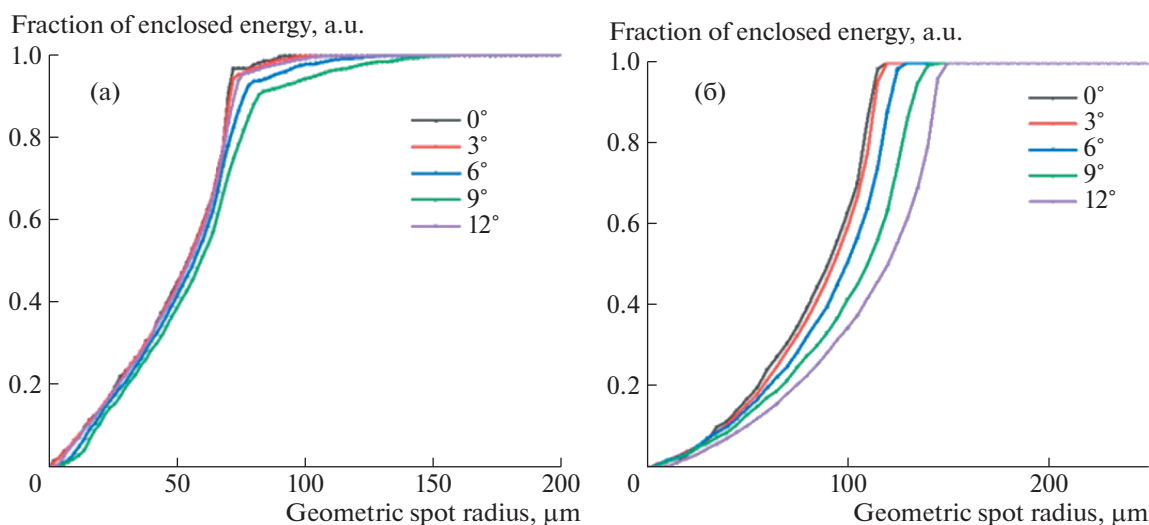


Рис. 10. Доля падающего излучения в зависимости от геометрического радиуса пятна рассеяния: **а** – система из трех линз, **б** – система из четырех линз для разных углов падения.

Таблица 4. Эффективность сбора излучения и угловое разрешение оптических систем

Система линз	η при 0° , %	η при 3° , %	η при 6° , %	η при 9° , %	η при 12° , %	Угловое разрешение
Тонкая линза	98.9	98.7	97.9	97.1	96.4	0.500°
Линза со сферическим расположением оптических волокон или жгутов волокон	98.9	98.6	97.9	97.1	96.5	0.300°
Система из трех линз	93.4	93.2	92.9	92.8	92.7	0.125°
Система из четырех линз	86.6	86.6	86.4	85.5	82.6	0.100°

линзовых систем и составляют 82.6% и более при различных углах падения. Оптическая система с тремя линзами имеет наилучшие характеристики для использования при реализации позиционно-чувствительных датчиков искры. Радиусы геометрических пятен рассеяния при всех рассмотренных углах падения изменяются в диапазоне от 77 до 114 мкм, что является наилучшим показателем по сравнению со всеми рассмотренными системами. Угловое разрешение трехлинзовой системы составляет 0.112° , что является лучшим показателем среди исследуемых систем. Такая система также имеет отличную эффективность сбора излучения со значением более 0.965 при разных углах падения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках проекта по договору № 17484ГУ/2022, конкурс УМНИК-21(в).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meggers W.F., Corliss C.H., Scribner B.F. Tables of spectral-line intensities V. 32. National Bureau of Standards. 1961.
2. Kazachkov U.P. // Instrum. Exp. Technol. 2009. V. 52. P. 287. <https://doi.org/10.1134/S0020441209020298>
3. Kazachkov U.P. // Tech. Phys. Lett. 2008. V. 34. P. 895. <https://doi.org/10.1134/S1063785008100258>
4. Tang J. // Energies. 2012. V. 5. P. 1490. <http://doi.org/10.3390/en5051490>
5. Agafonova D.S., Sidorov A.I. // J. Opt. Technol. 2011. V. 78. P. 735. <https://doi.org/10.1364/JOT.78.000735>
6. Агафонова Д.С., Сидоров А.И. Патент РФ 2459222. 2010.
7. Agafonova D.S., Sidorov A.I. // J. Opt. Technol. 2020. V. 87. P. 127. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000127>
8. Sidorov A.I., Lisenkova A.E., Tsepich V.P., Goryainov V.S. // J. Opt. Technol. 2020. V. 87. P. 562. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000562>
9. Sidorov A.I., Pleshanov I.M. Патент РФ 2715477. 2020.
10. Agafonova D.S., Sidorov A.I. // Opt. Eng. 2015. V. 54. P. 117107. <https://doi.org/10.1117/1.OE.54.11.117107>
11. Dubrovina V.D., Ignatiev A.I., Nikonov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdova T.A., Agafonova D.S. // Opt. Mat. 2010. V. 36. P. 753. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2013.11.018>
12. Pleshanov I.M., Agafonova D.S., Belorus A.O., Pastukhov A.I., Sherimov D. // IEEE Int. Conf. on El. Eng. and Phot. (EEXPolytech). 2018. P. 275. <https://doi.org/10.1109/EEXPolytech.2018.8564398>
13. Sgibnev Y.M., Nikonov N.V., Ignatiev A.I. // J. Lum. 2017. V. 188. P. 172. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.04.028>
14. Shestakov M.V., Chibotaru L.F., Tikhomirov V.K., Rodriguez V.D., Velázquez J.J., Moshchalkov V.V. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2013. V. 15. P. 15949. <https://doi.org/10.1039/C3CP52681J>
15. Marasanov D.V., Mironov L.Y., Sgibnev Y.M., Kolesnikov I.E., Nikonov N.V. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2020. V. 22. P. 23342. <https://doi.org/10.1039/D0CP02786C>