

УДК 535.399

## Позиционно-чувствительный датчик искры со спектральным преобразованием излучения

© 2020 г. **А. И. Сидоров\***, \*\*, доктор физ.-мат. наук; **А. Е. Лисенкова\***, студент;  
**В. П. Цепич\***, студент; **В. С. Горяинов\***, канд. техн. наук

\*Университет ИТМО, Санкт-Петербург

\*\*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

E-mail: sidorov@oi.ifmo.ru

Поступила в редакцию 15.04.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-09-82-87

Методами численного моделирования показано, что при использовании в позиционно-чувствительном малогабаритном датчике искры угловое разрешение датчика в диапазоне углов  $\pm 6,5^\circ$  может составлять  $0,1^\circ$ . Использование в датчике спектрального преобразователя излучения в виде люминесцентной тонкой полимерной пленки с длительным послесвечением позволяет увеличить пространственное разрешение, а также увеличить чувствительность датчика к коротким электрическим разрядам. Тестирование макета датчика искры показало, что его пространственное разрешение достаточно для надежного определения местоположения искры в пространстве. Полученные результаты могут быть использованы при разработке средств предупреждения аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** датчик искры, люминесценция, спектральное преобразование, пространственное разрешение.

**Коды OCIS:** 160.2540, 160.5690, 280.4788

### ВВЕДЕНИЕ

Задача детектирования электрической искры и коронного разряда возникает в связи с необходимостью обеспечения правильной и безопасной работы устройств и оборудования, а также для предупреждения аварий, связанных с возникновением взрывоопасных и пожароопасных ситуаций. Среди существующих методов обнаружения электрического разряда оптические методы, т.е. основанные на обнаружении оптического излучения от разряда, обладают такими преимуществами как высокое быстродействие и селективность. Однако непосредственная фотометрическая регистрация излучения искры с помощью оптоэлектронных устройств затруднительна в условиях повышенных электромагнитных полей, что является характерным для устройств и оборудо-

вания (силовые установки, трансформаторы, электродвигатели). Проблема может быть решена при использовании волоконно-оптического датчика, чувствительный элемент которого выполнен из диэлектрических материалов и нечувствителен к электромагнитным наводкам. Оптический сигнал от датчика может передаваться по волокну к фотоприемному устройству (ФПУ), расположенному на значительном удалении от источника помех. Это позволяет исключать влияние сильных электромагнитных полей на электронную часть датчика.

Существует ряд волоконно-оптических датчиков электрической дуги, в которых используется преобразование излучения, падающего на боковую поверхность полимерного волокна или оптоволоконного жгута, в волноводные

моды [1–5]. Такое преобразование происходит за счет рассеяния падающего излучения на оптических неоднородностях волокна, поэтому оно крайне неэффективно.

Излучение электрического разряда, в основном, находится в ультрафиолетовом (УФ) спектральном диапазоне. Так, излучение разряда между контактами из Fe находится в спектральном интервале 250–450 нм, из Al — 300–400 нм, из Cu — вблизи 325 нм [6]. Излучение коронного разряда занимает спектральный интервал 300–400 нм [7]. Непосредственная передача УФ излучения искры по волокну к ФПУ неэффективна из-за больших оптических потерь в волокне электромагнитных волн данного спектрального диапазона. В работах [8, 9] для повышения эффективности регистрации искры было предложено использовать полимерные волокна с люминесцентным красителем, в которых происходит спектральное преобразование УФ излучения искры в видимую область спектра. Для дальнейшего повышения эффективности регистрации искры и уменьшения габаритов датчика в работах [10–13] было предложено использовать цилиндрическую линзу, фокусирующую излучение искры на люминесцентное волокно. Использование цилиндрической линзы позволяет также определять пространственное положение искры по одной координате [14].

Важной задачей является не только регистрация электрического разряда, но и определение места его положения. Это дает возможность оперативно устранять возникшие неисправности. Поэтому актуальной задачей является создание позиционно-чувствительного датчика искрения.

Целью данной работы была разработка макета позиционно-чувствительного двухкоординатного датчика искры со спектральным преобразованием излучения. При разработке датчика также обращалось внимание на такие характеристики как угловое разрешение, низкая стоимость, малые габариты и технологичность.

## МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Расчет оптической схемы датчика и определение его оптических характеристик проводились с помощью программного пакета ZEMAX в лучевом приближении.

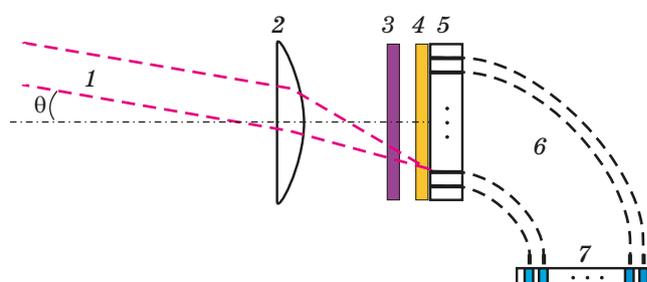
Спектры люминесценции и оптической плотности спектрального преобразователя измерялись с помощью спектрофлуориметра LS-55 и спектрофотометра *Lambda-650* (*Perkin Elmer*) соответственно при комнатной температуре.

В качестве имитатора искры использовались полупроводниковый УФ светодиод (*Qingying*) с излучением длиной волны  $\lambda = 365$  нм и третья гармоника ( $\lambda = 355$  нм) импульсного YAG:Nd-лазера LS-2131M (*Lotis TII*) с длительностью импульса 5 нс.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Конструкция датчика искры и его характеристики определяются конкретными условиями его эксплуатации. Так, для удаленной искры ее излучение можно рассматривать как параллельный пучок света. В этом случае в датчике может быть использована одна положительная линза. Близкорасположенная искра может рассматриваться как точечный источник с расходящимся излучением. В этом случае для регистрации ее излучения необходимо использовать двухлинзовый телескоп или объектив. Пространственное разрешение датчика искры также зависит от условий его эксплуатации. Поэтому в данной работе на примере датчика первого типа изучались основные особенности датчиков искрения, общие для разных его конструкций.

Оптическая схема позиционно-чувствительного датчика искры и коронного разряда представлена на рис. 1. Ультрафиолетовое излучение искры или коронного разряда проходит через положительную линзу и фокусируется



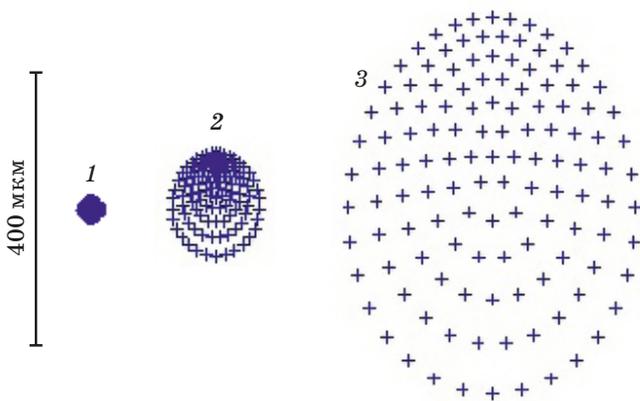
**Рис. 1.** Оптическая схема датчика искры и коронного разряда. 1 — лучи от источника искрения, 2 — линза, 3 — УФ фильтр, 4 — люминесцентная пластина, 5 — входной блок волоконных жгутов, 6 — волоконные жгуты, 7 — матрица фотоприемников.

на пластине из люминесцентного стекла. Перед пластиной расположен УФ фильтр из оптического стекла УФС5, отсекающий излучение видимой области спектра. Наличие фильтра позволяет использовать датчик в освещенных помещениях. В области фокуса линзы возникает люминесценция, излучение которой попадает на одну из секций входного блока волоконных жгутов и передается по волоконным жгутам на матрицу ФПУ.

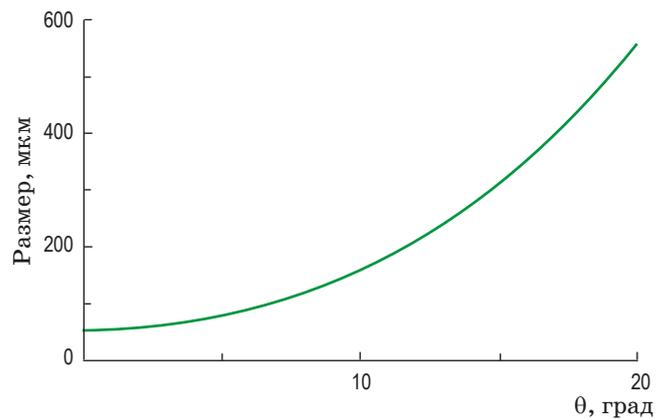
Расчет распределения поля излучения в фокусе линзы при разных углах падения  $\theta$  проводился для линзы с фокусным расстоянием 56 см. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Из рисунка видно, что при увеличении угла падения происходит не только увеличение пятна в фокальной плоскости линзы, но и изменение его формы. При увеличении угла падения от 0 до 20° продольный размер пятна увеличивается от 50 до 560 мкм (рис. 3). Таким образом, увеличение угла падения приводит к существенному ухудшению пространственного разрешения датчика. Данного эффекта можно избежать, используя люминесцентную пластину сферической формы и располагая входные торцы волоконных жгутов на сферической поверхности. Однако это существенно усложняет конструкцию датчика и увеличивает его стоимость.

Используя зависимость, приведенную на рис. 3, можно оценить оптимальный диапазон углов обзора с точки зрения углового разрешения. Так, пространственное разрешение изме-



**Рис. 2.** Точечные диаграммы распределения поля излучения в фокальной плоскости линзы. 1 —  $\theta = 0^\circ$ , 2 —  $10^\circ$ , 3 —  $20^\circ$ .

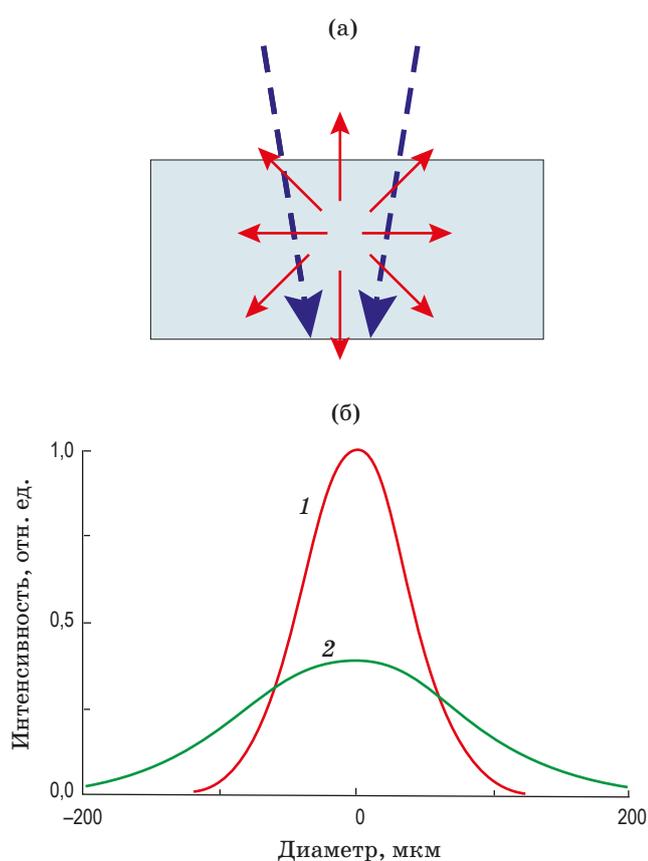


**Рис. 3.** Зависимость продольного размера пятна в фокальной плоскости линзы от угла падения излучения.

няется в 2 раза в диапазоне углов обзора  $\pm 6,5^\circ$ . В данном диапазоне могут быть использованы волоконные жгуты или волокна диаметром 100 мкм. Угловое разрешение в этом случае составляет примерно  $0,1^\circ$ .

В качестве люминесцентной пластины в датчике искры могут быть использованы люминесцентные цветные оптические стекла, например ЖС18, ОС19, содержащие люминесцентные квантовые точки (КТ) CdS или CdSe. Однако использование относительно толстых (2–3 мм) люминесцентных пластин также приводит к ухудшению пространственного разрешения датчика. Причиной этого является то, что излучение люминесценции распространяется во все стороны из области возбуждения (см. рис. 4а). Это приводит к уменьшению интенсивности излучения, попадающего на ФПУ, а также к увеличению диаметра светящегося пятна. На рис. 4б представлены расчетные распределения интенсивности излучения в области фокуса линзы при  $\theta = 0^\circ$  и толщине люминесцентной пластины 3 мм без учета и с учетом люминесценции. В последнем случае для расчета использовалась модель излучающего цилиндра. Из рисунка видно, что наличие люминесценции в толстой пластине приводит к увеличению диаметра пятна в 2 раза.

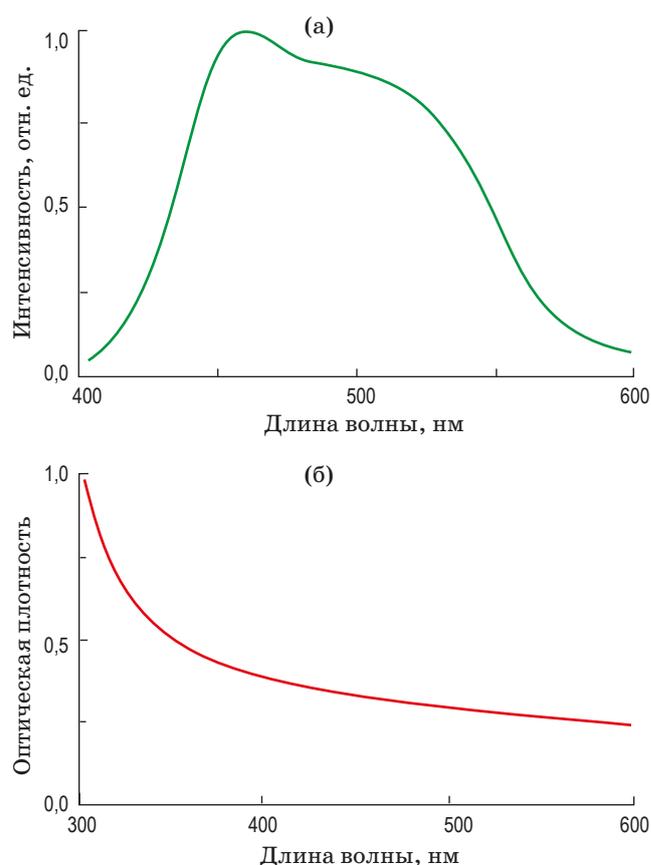
Влияние данного негативного фактора может быть значительно уменьшено при использовании в качестве спектрального преобразователя тонкой полимерной пленки, содержащей люминесцентные центры и нанесенной непосредственно на входные торцы волоконных



**Рис. 4.** Схема формирования поля излучения люминесценции в люминесцентной пластине (а) и расчетное распределение излучения в фокальной плоскости линзы в случае  $\theta = 0^\circ$  без учета люминесценции (1) и с учетом люминесценции в приближении излучающего цилиндра (2) (б).

жгутов. На рис. 5а приведен спектр люминесценции полимерной пленки с КТ ZnS:Cu. Их объемная концентрация в пленке составляет 40%. Из рисунка видно, что спектр люминесценции состоит из двух широких перекрывающихся полос с максимумами на  $\lambda = 450$  и  $500$  нм. Первая полоса люминесценции связана с излучательной рекомбинацией в вакансиях ( $V_{Zn}$ ), вторая полоса — с излучательной рекомбинацией в дважды заряженной вакансии серы, а также с излучательными переходами с глубоких примесных уровней, образованных ионами меди [15].

Спектр оптической плотности полимерной пленки с КТ ZnS:Cu представлен на рис. 5б. Из рисунка видно, что резкое увеличение оптической плотности происходит на  $\lambda < 350$  нм. Расчет показывает, что эффективный коэффициент поглощения в области 300–400 нм ле-

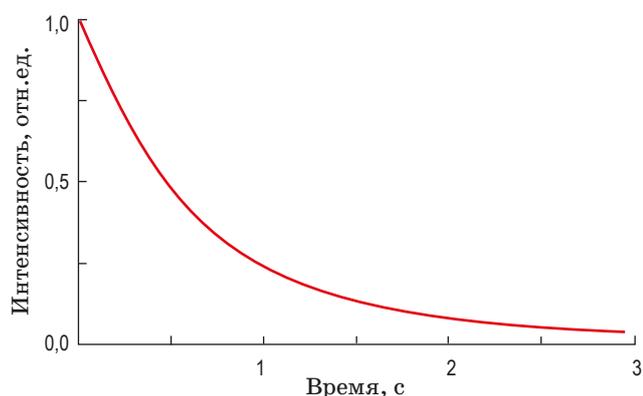


**Рис. 5.** Спектры люминесценции (а) и оптической плотности (б) полимерной пленки с КТ ZnS:Cu. Длина волны возбуждения люминесценции 360 нм.

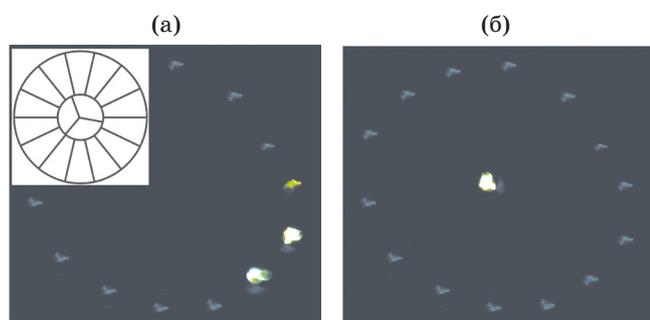
жит в спектральном интервале  $690\text{--}250\text{ см}^{-1}$ , в нем доля поглощенного УФ излучения превышает 99,5%.

Достоинством КТ ZnS:Cu является также их длительное послесвечение. На рис. 6 приведена интегральная кривая затухания люминесценции полимерной пленки с КТ ZnS:Cu. Для возбуждения люминесценции использовался наносекундный лазерный импульс с  $\lambda = 355$  нм. Из рисунка видно, что время затухания люминесценции составляет примерно 2 с. Это позволяет для регистрации коротких электрических разрядов использовать дешевые фотодиоды с низким быстродействием.

Для тестирования датчика искры был изготовлен макет, оптическая схема которого приведена на рис. 1. Для уменьшения габаритов в макете использовалась линза с фокусным расстоянием 30 мм. В качестве УФ фильтра использовалось цветное оптическое стекло УФС5, имеющее полосу пропуска-



**Рис. 6.** Кривая затухания люминесценции полимерной пленки с КТ ZnS:Cu. Длина волны возбуждения люминесценции 355 нм.



**Рис. 7.** Фотографии выходных торцов волоконных жгутов при углах падения  $\theta = 10^\circ$  (а),  $\theta \approx 0^\circ$  (б). На вставке — расположение и геометрия торцов волоконных жгутов во входном блоке волоконных жгутов.

ния в спектральном интервале 250–420 нм. Непосредственно за УФ фильтром располагался спектральный преобразователь в виде полимерной пленки толщиной 100 мкм с КТ ZnS:Cu. Расположение и геометрия торцов волоконных жгутов во входном блоке волоконных жгутов показаны на вставке в рис. 7а.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Казачков Ю.П. Устройство для отключения комплексных распределительных устройств // Патент РФ № 2096887. 1997.
2. Казачков Ю.П. Волоконно-оптический датчик открытой электрической дуги // Патент РФ № 2237332. 2004.
3. Казачков Ю.П. Боковой захват оптического излучения волоконным световодом // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 20. С. 73–76.
4. Казачков Ю.П. Волоконно-оптический распределенный позиционно чувствительный датчик электрической дуги // Приб. техн. экспер. 2009. № 2. С. 145–147.
5. Казачков Ю.П. Определение местоположения светящейся области внутри волоконно-оптического жгута // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 3. С. 107–110.

Входной блок состоял из 17 сегментов. Диаметр входного блока волоконных жгутов — 10 мм. В качестве имитатора искры использовался УФ светодиод с  $\lambda = 365$  нм, расположенный на расстоянии 1 м от линзы. На рис. 7 представлены фотографии выходных торцов волоконных жгутов при  $\theta = 10$  и  $0^\circ$ . Для наглядности выходные торцы волоконных жгутов расположены в той же последовательности, что и во входном блоке, и с них удалены фотодиоды. Из рисунка видно, что при  $\theta = 10^\circ$  регистрация происходит одновременно в двух соседних волоконных жгутах. В то же время в случае данного макета этого достаточно для надежного определения положения искры в пространстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное моделирование показало, что при использовании в позиционно-чувствительном датчике искры линзы с фокусным расстоянием 56 см угловое разрешение датчика в диапазоне углов  $\pm 6,5^\circ$  может составлять  $0,1^\circ$ . Использование в датчике спектрального преобразователя излучения в виде люминесцентной тонкой полимерной пленки с длительным послесвечением не только увеличивает пространственное разрешение, но и увеличивает чувствительность датчика к коротким электрически разрядам. Проведено тестирование макета датчика искры, которое показало, что его пространственное разрешение достаточно для надежного определения положения искры в пространстве. Полученные результаты могут быть использованы при разработке средств предупреждения аварийных ситуаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проект 16.1651.2017/4.6).

6. *Зайдель А.Н., Прокофьев В.Д., Райский С.М., Шрейдер Е.Я.* Таблицы спектральных линий. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1962. 607 с.
7. *Muhr M.* Experience with optical partial discharge detection // *Mater. Sci.* — Poland. 2009. V. 27. № 4/2. P. 1139–1146.
8. *Lee C., Kalar K., Sallee B., Hallidy B.* Fiber optic fluorescent sensor for electric discharge detection // *The Conf. Mater. Optical Fiber Sensors.* Cancun, Mexico, 2006. P. 4.
9. *Lee C., Kalar K.* Systems and methods for detecting electric discharge // Patent US7,668,412 B2. 2009.
10. *Tang J.* A transformer partial discharge measurement system based on fluorescent fiber // *Energies.* 2012. V. 5. P. 1490–1502.
11. *Агафонова Д.С., Сидоров А.И.* Волоконно-оптический датчик искры и дуги со спектральным преобразованием детектируемого излучения // *Оптический журнал.* 2011. Т. 78. № 11. С. 50–54.
12. *Агафонова Д.С., Сидоров.* Волоконный датчик искры и электрической дуги // Патент РФ № 2459222. 2010.
13. *Agafonova D.S., Kolobkova E.V., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Shakhverdov T.A., Shirshnev P.S., Sidorov A.I., Vasiliev V.N.* Luminescent glass fiber sensors for ultraviolet radiation detection by the spectral conversion // *Opt. Eng.* 2015. V. 54. P. 117107-1–8.
14. *Агафонова Д.С., Сидоров А.И.* Влияние геометрических факторов на эффективность регистрации электрической искры волоконным датчиком с люминесцентной оболочкой // *Оптический журнал.* 2020. Т. 86. № 2. С. 76–81.
15. *Physics and chemistry of II-VI compounds / Ed. by Aven M. and Prener J.S.* Amsterdam: Wiley-Interscience, 1967. 456 p.