

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.7.068

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ИНДИКАТОР ВОЗНИКОВЕНИЯ ИСКРЫ И ДУГИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ДЕТЕКТИРУЕМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2011 г. Д. С. Агафонова*; А. И. Сидоров**, доктор физ.-мат. наук

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: aisidorov@qip.ru

Представлены результаты исследования характеристик волоконно-оптического датчика искрения на основе спектрального преобразования излучения искры в длинноволновую область спектра. Показано, что при использовании в датчике волокна с полимерным покрытием, содержащим родамин 6G, и цилиндрической линзы чувствительность датчика может быть увеличена более чем в 200 раз. Предложенный датчик обладает узкой диаграммой направленности, что позволяет определять пространственное положение источника сигнала (электрического разряда).

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, люминесценция, электрическая искра, электрическая дуга, родамин 6G.

Коды OCIS: 060.2270, 060.2290, 060.2370

Поступила в редакцию 14.02.2011

Введение

При разработке систем аварийной защиты высоковольтного и электрораспределительного оборудования от последствий возникновения электрического искрения или электрической дуги встает задача индикации этого искрения или дуги, определения их местоположения и мощности. В механических устройствах искрение может возникать за счет трения или ударов механических узлов, что увеличивает их износ и может приводить к аварийным ситуациям, пожару или взрыву в присутствии легковоспламеняющихся веществ. Задача индикации искрения и электрической дуги возникает на электростанциях, в высоковольтных установках, на линиях электропередачи, на пожаро- и взрывоопасных предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности, в шахтах и на транспорте.

Фотоэлектронные устройства, основанные на непосредственной регистрации излучения электрического разряда фотоприемником [1], обладают недостатками – существует вероят-

ность их ложного срабатывания в условиях сильных электромагнитных помех и электрического пробоя при высокой напряженности электрических полей в высоковольтных установках. Волоконно-оптические датчики лишины этих недостатков, так как оптический сигнал не чувствителен к электромагнитным помехам, а датчик может быть полностью изготовлен из диэлектрических материалов.

Существует ряд волоконно-оптических датчиков электрической дуги, в которых используется преобразование излучения, падающего на боковую поверхность полимерного волокна или оптоволоконного жгута, в волноводные моды [2–7]. Такое преобразование происходит за счет рассеяния падающего излучения на оптических неоднородностях волокна и поэтому оно крайне неэффективно.

Целью работы было создание волоконно-оптического датчика для обнаружения несанкционированных электрических разрядов (искры, дуги) и обладающего высокой чувствительностью, пространственной избирательностью и малыми габаритами.

Постановка задачи

Спектральный состав и яркость излучения электрической искры и дуги в сильной степени зависят от энергии, разряда, материала электродов и состава газовой среды, в которой происходит разряд. Так, излучение электрического дугового разряда в мощных высоковольтных установках имеет высокую яркость и занимает широкий спектральный диапазон, определяемый свечением ионизированного газа в области дуги. В этом случае, как правило, нет необходимости повышать чувствительность волоконного датчика. При возникновении искрения в контактах маломощных электрических установок, в местах разрыва проводов, а также при ударе или трении металлических деталей яркость излучения мала, а спектр излучения определяется возбужденными атомами и ионами материала контактирующих предметов. Наиболее яркие спектральные линии ионов Fe лежат в спектральном интервале $\lambda = 250\text{--}450$ нм, Al – $\lambda = 300\text{--}400$ нм, Ag – $\lambda = 300\text{--}550$ нм, Cu – $\lambda = 320\text{--}530$ нм [8], то есть в ультрафиолетовой и коротковолновой части видимой области спектра. Проблемы, возникающие при детектировании сигнала в этом случае, и возможный путь их решения качественно иллюстрирует рис. 1. Потери на светорассеяние в кварцевом волокне пропорциональны $1/\lambda^4$ (кривая 2). Так, если для $\lambda = 800$ нм затухание оптического сигнала в кварцевом волокне, связанное со светорассеянием, составляет примерно 2 дБ/км [9], то для излучения искры с $\lambda = 250\text{--}450$ нм (кривая 1) потери будут составлять 30–40 дБ/км. Это накладывает ограничения на допустимую длину волокна от чувствительного элемента датчика до фотоприемного устройства. Максимум чувствительности кремниевого фотодиода лежит в спектральном интервале 820–960 нм (кривая 3). Это также снижает эффективность детектирования коротковолнового излучения искры.

Проблемы повышения чувствительности волоконно-оптического датчика искрения могут быть решены путем спектрального преобразования коротковолнового излучения искры в длинноволновое излучение. Для этого может быть использовано волокно с люминесцентной добавкой либо волокно, имеющее люминесцентное покрытие. В качестве люминесцентного вещества может быть использован органический краситель, например родамин 6G (R6G), преобразующий коротковолновое из-

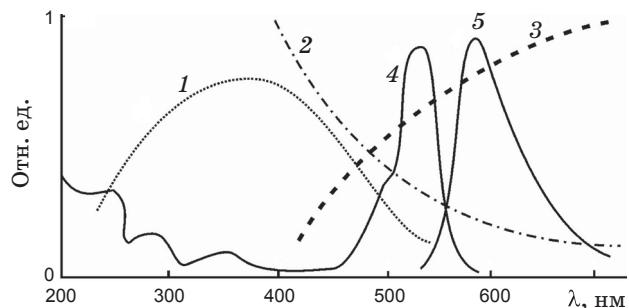


Рис. 1. Качественное сравнение спектральных характеристик излучения искры (1), потерь на светорассеяние в оптическом волокне (2), чувствительности кремниевого фотодиода (3), поглощения R6G (4) и люминесценции R6G (5).

лучение искры в спектральную область малых потерь волокна и высокой чувствительности фотоприемника. Излучение искры, попадающее на покрытие с люминесцентной добавкой, возбуждает в нем люминесценцию в спектральном интервале, смещенном в длинноволновую область спектра. Молекулы люминесцентного вещества являются излучающими диполями. Излучение диполя, расположенного в непосредственной близости от оптического волновода или волокна, эффективно преобразуется в волноводные моды [10]. Эффективность такого подхода иллюстрируют кривые 4 и 5 на рис. 1.

Использование R6G позволяет преобразовать излучение из спектрального интервала 200–530 нм в спектральный интервал 580–650 нм. Спектр оптического сигнала может быть смещен в еще более длинноволновую область спектра при использовании таких красителей, как родамин В или нильский голубой, имеющих полосы люминесценции в областях 650–700 нм и 700–800 нм соответственно. Однако квантовый выход люминесценции у этих красителей существенно ниже, чем у R6G.

Методика экспериментов

Конструкция чувствительного элемента волоконного датчика искрения показана на рис. 2. Чувствительный элемент датчика состоит из многомодового оптического волокна без оболочки, изготовленного из кварцевого стекла 3. Диаметр волокна 220 мкм. Участок волокна имеет покрытие в виде слоя полимера (нитроцеллюлоза) толщиной 20 мкм. Длина слоя с покрытием 30 мм. В полимер добавлен краситель R6G с концентрацией 0,5%. Выбор в качестве материала полимерного покрытия из нитроцел-

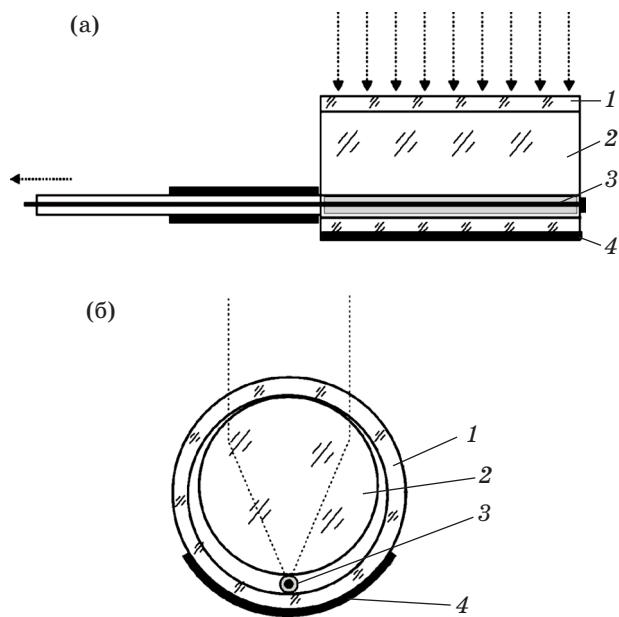


Рис. 2. Конструкция чувствительного элемента волоконного датчика искры: а – вид сбоку, б – вид с торца. 1 – стеклянная трубка, 2 – цилиндрическая линза, 3 – оптоволокно, 4 – отражающее покрытие.

люзозы обусловлен тем, что в ней может быть реализована высокая интенсивность люминесценции R6G. Параллельно участку волокна с покрытием и вплотную к нему расположена цилиндрическая линза 2 в виде стеклянного стержня диаметром 4,8 мм. Использование линзы, фокусирующей излучение искры на волокно, позволяет уменьшить габариты датчика без ухудшения чувствительности и улучшить диаграмму его направленности. Для защиты датчика от загрязнений и повреждений волокно и линза помещены в стеклянную трубку 1. На часть внешней поверхности трубки нанесено отражающее покрытие 4, что позволяет увеличить эффективность сбора излучения искры. Для проведения сравнительных экспериментов был изготовлен ряд чувствительных элементов:

№ 1 – кварцевое волокно без полимерного покрытия, с цилиндрической линзой и зеркальным отражателем;

№ 2 – волокно из поливинилового спирта ($\varnothing 200$ мкм), содержащее добавку R6G, без цилиндрической линзы и зеркального отражателя;

№ 3 – кварцевое волокно с полимерным покрытием, содержащее добавку R6G, без цилиндрической линзы и зеркального отражателя;

№ 4 – кварцевое волокно с полимерным покрытием, содержащее добавку R6G, без зеркального отражателя;

№ 5 – кварцевое волокно с полимерным покрытием, содержащее добавку R6G, с цилиндрической линзой и зеркальным отражателем.

При проведении измерений в качестве источников излучения использовали галогенную лампу ($P = 20$ Вт), полупроводниковые лазеры KLM-530-5 ($\lambda = 530$ нм, $P = 20$ мВт) и KLM-405-6 ($\lambda = 405$ нм, $P = 3$ мВт), а также ртутную лампу низкого давления ($\lambda = 365$ нм). Источником искры служили два стальных контакта, при замыкании которых происходил разряд конденсатора ($C = 50$ мкФ, $U = 30–50$ В). В качестве фотоприемного устройства использовали кремниевый pin-фотодиод BPW20RF, включенный в фотодиодном режиме без усилителя.

Обсуждение результатов

В табл. 1 приведены данные, характеризующие эффективность захвата внешнего излучения боковой поверхностью волокна с преобразованием этого излучения в волноводные моды для разных конструкций датчиков. Источником излучения служила галогенная лампа, расположенная на расстоянии 20 см от чувствительного элемента датчика. Из таблицы видно, что эффективность преобразования бокового излучения в волноводные моды кварцевым волокном без покрытия (№ 1) крайне мала. При использовании в датчике полимерного волокна с люминесцентной добавкой (№ 2) эффективность преобразования значительно повышается, однако она в 4 раза ниже, чем для кварцевого волокна с полимерным люминесцентным покрытием (№ 3). Это связано с тем, что полимерное волокно обладает высоким светорассеянием, которое приводит к существенным потерям захваченного излучения. В случае кварцевого волокна с люминесцентным покрытием потери на светорассеяние значительно-

Таблица 1. Сигнал фотоприемника для разных конструкций датчиков

Чувствительный элемент	Сигнал фотоприемника, мВ
№ 1	< 0,1
№ 2	0,7
№ 3	2,8
№ 4	17,6
№ 5	20,8

Таблица 2. Сигнал фотоприемника для чувствительного элемента № 5

Длина волны, нм	Сигнал фотоприемника, мВ
530	20,1
405	12
365	12,5

но ниже, а эффективность захвата излучения обеспечивается преобразованием излучения молекулами красителя в волноводные моды. Использование цилиндрической линзы (№ 4) и отражающего покрытия (№ 5) позволяет значительно повысить чувствительность датчика за счет увеличения площади захвата излучения. Чувствительность такого датчика более чем в 200 раз превышает чувствительность датчика аналогичной конструкции, но без люминесцентного покрытия.

В табл. 2 приведены результаты измерения сигнала фотоприемника при освещении чувствительного элемента № 5 излучением с плотностью мощности $P = 0,5 \text{ мВт}/\text{см}^2$ и $\lambda = 530, 405$ и 365 нм . Из таблицы видно, что максимальная чувствительность датчика обеспечивается на длине волны 530 нм . Это вызвано тем, что на данной длине волны R6G имеет максимальное поглощение.

На рис. 3 показана осциллограмма сигнала фотоприемника для чувствительного элемента № 5 при регистрации излучения электрической искры, расположенной на расстоянии 10 см. Энергия разряда искры была равна $2,25 \times 10^{-2} \text{ Дж}$. Из рисунка видно, что датчик позволяет надежно регистрировать излучение искры и обеспечивает быстродействие, достаточное для большинства практических применений. Квантовый выход люминесценции R6G превышает 0,9 [11]. Это позволяет регистрировать излучение при искрении малой мощности.

При измерении диаграммы направленности датчика № 5 в качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер с $\lambda = 530 \text{ нм}$. Расходящийся лазерный пучок направлялся на рабочую поверхность датчика, который поворачивался в горизонтальной (I) и вертикальной (II) плоскостях (рис. 4а). Измерения показали, что в горизонтальной плоскости датчик обладает узкой диаграммой направленности, не превышающей 15° (рис. 4б). Это обеспечивает высокое пространственное разре-

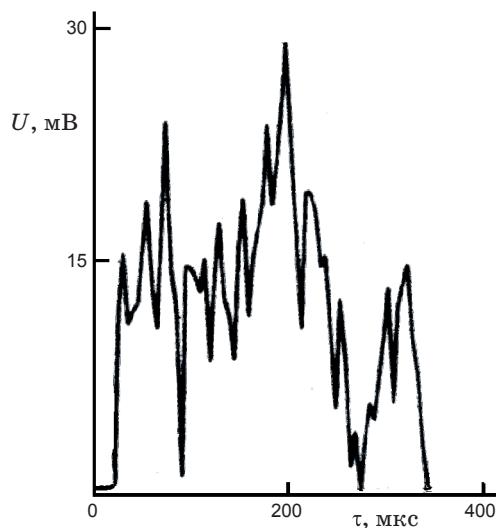


Рис. 3. Осциллограмма сигнала фотоприемника при регистрации датчиком № 5 излучения электрической искры.

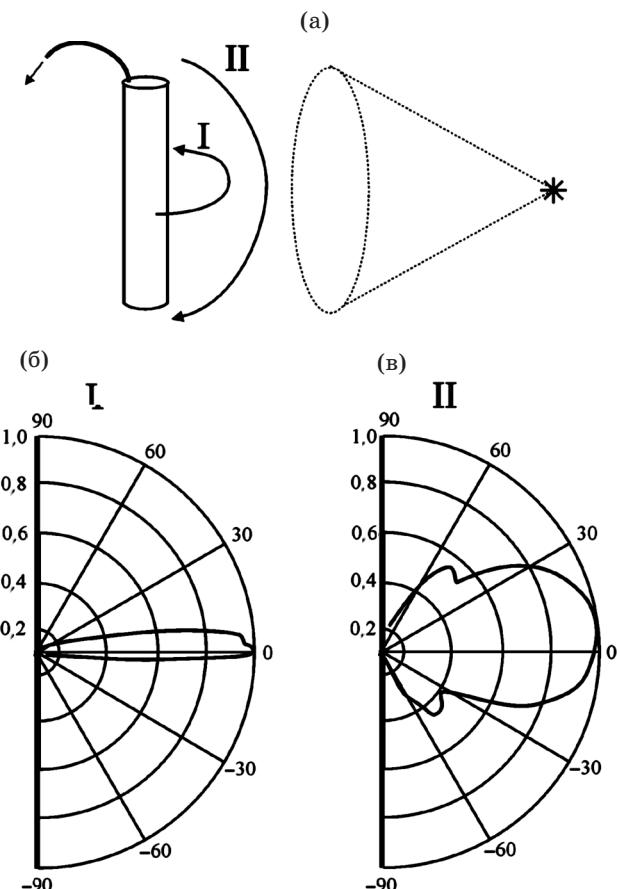


Рис. 4. Диаграммы направленности чувствительного элемента волоконного датчика искры. а – оптическая схема измерений, б – диаграмма направленности в горизонтальной плоскости (I), в – диаграмма направленности в вертикальной плоскости (II).

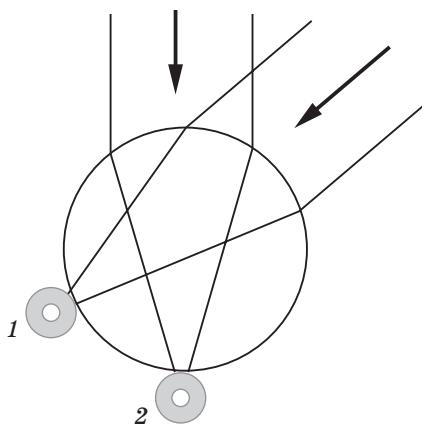


Рис. 5. Схематичное изображение датчика с двумя (1, 2) чувствительными элементами.

шение, позволяющее определять расположение источника искрения. В вертикальной плоскости диаграмма направленности составляет примерно 60° (рис. 4в).

Наличие узкой диаграммы направленности позволяет размещать на одной цилиндрической линзе два или более волокон с люминесцентным покрытием (рис. 5). Это позволяет регистрировать излучение, приходящее из разных областей пространства разными волокнами, так как области фокусов в этом случае будут разнесены по периметру цилиндрической линзы. Благодаря этому появляется возможность разделять сигналы от источников искрения, разнесенных в пространстве.

На рис. 6 показана зависимость сигнала фотоприемника от мощности падающего на датчик излучения. Измерения проводили в линейной области чувствительности фотодиода. Из рисунка видно, что характеристика датчика линейна. Это позволяет использовать его не только для регистрации искрения, но и для измерения интенсивности коротковолнового излучения при соответствующей калибровке.

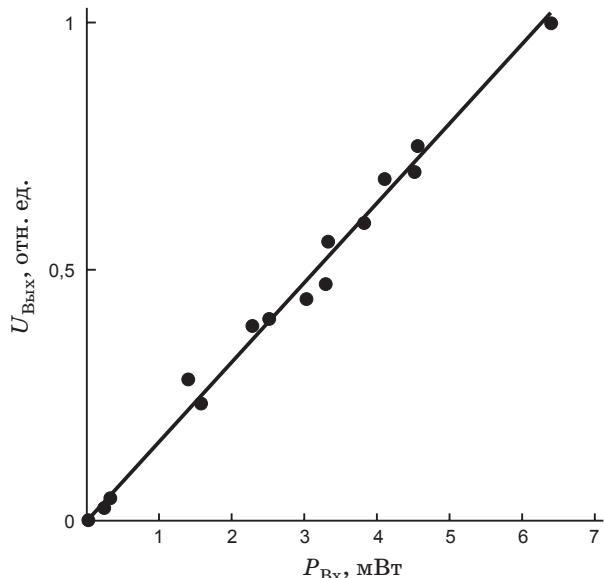


Рис. 6. Зависимость сигнала фотоприемника от мощности падающего на чувствительный элемент излучения ($\lambda = 530 \text{ нм}$).

Заключение

Представленные результаты показывают, что предложенная конструкция датчика искрения позволяет повысить чувствительность регистрации, уменьшить габариты и реализовать узкую диаграмму направленности. Это достигается за счет спектрального преобразования коротковолнового излучения искры люминесцентным красителем, эффективного преобразования излучения красителя в волноводные моды и применения цилиндрической линзы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке волоконных сенсорных систем для энергетических и высоковольтных установок, электрических станций и для устройств предотвращения техногенных катастроф.

Работа выполнена при поддержке гранта для аспирантов, докторантов и молодых ученых “КЭОП-43”.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

- Современные средства релейной защиты и противоаварийной автоматики // Каталог спецэкспозиции. М.: Союзтехэнерго, 1989. 15 с.
- Никитаев О.В., Селиванин А.У. Применение дуговых защит в комплексных распределительных устройствах сельскохозяйственных подстанций. Эксплуатация устройств сельскохозяйственного электроснабжения // Сборник научных трудов. М., 1989. 44 с.
- Казачков Ю.П. Устройство для отключения комплексных распределительных устройств // Патент РФ № 2096887. 1997.

4. Казачков Ю.П. Волоконно-оптический датчик открытой электрической дуги // Патент РФ № 2237332. 2004.
 5. Казачков Ю.П. Боковой захват оптического излучения волоконным световодом // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 20. С. 73–76.
 6. Казачков Ю.П. Волоконно-оптический распределенный позиционно чувствительный датчик электрической дуги // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 2. С. 145–147.
 7. Казачков Ю.П. Определение местоположения светящейся области внутри волоконно-оптического жгута // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 3. С. 107–108.
 8. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Шрейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. М.: Физматлит, 1962. 607 с.
 9. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2004. 496 с.
 10. Soler B.J., Hall D.G. Scattering enhancement from an array of interacting dipoles near a planar waveguide // JOSA. B. 2002. V. 19. № 10. P. 2437–2448.
 11. Копылов С.М., Лысой Б.Г., Серегин С.Л., Чередниченко О.Б. Перестраиваемые лазеры на красителях и их применение. М.: Радио и связь, 1991. 240 с.
-