

Усовершенствование устройства диагностики неисправностей высоковольтного оборудования

А. В. Лукин¹, А. Н. Мельников¹, Н. К. Павлычева², А. Н. Чеплаков^{1,2}

¹ О «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

² Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

В докладе предложена усовершенствованная оптическая схема устройства дистанционной диагностики неисправностей высоковольтного оборудования, работающего в 3-х оптических диапазонах. Моделирование и оптимизация параметров зеркального объектива типа Кассегрен и пропускающей вогнутой голограммной дифракционной решетки из флюорита проводились при помощи программного обеспечения «OpticStudio Zemax». Даны оптические параметры оптимизированной оптической схемы и их сравнение с исходными.

Ключевые слова: Коронный разряд, Устройство диагностики, Оптическая схема, Зеркальный объектив, Дифракционная решетка, Оптимизация оптических параметров.

Цитирование: Лукин, А. В. Усовершенствование устройства диагностики неисправностей высоковольтного оборудования / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Н. К. Павлычева, А. Н. Чеплаков // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 430–434.

Количество эксплуатируемого высоковольтного оборудования (ВВО) и линий электропередач (ЛЭП) ежегодно растет, и чтобы обеспечить его своевременной диагностикой для предотвращения аварийных ситуаций, используют специальные устройства. Портативное устройство диагностики неисправностей высоковольтного оборудования ранее было предложено в [1, 2] и усовершенствовано в [3, 4]. Цель данной работы — увеличение спектрального разрешения устройства и дисперсии рассчитываемой пропускающей вогнутой голограммной дифракционной решетки (ПВГДР).

Излучение коронного разряда на поверхности изоляционных конструкций ВВО и ЛЭП имеет характерный спектр в ультрафиолетовом (УФ), видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах (рис. 1). На рис.1 видно, что основное излучение сконцентрировано в УФ диапазоне длин волн 250 – 400 нм и ближнем ИК диапазоне длин волн 700 – 900 нм, и оно становится интенсивнее при увеличении напряжения ВВО и ЛЭП [5]. Часть спектра коронного разряда перекрывается сильным УФ солнечным излучением в спектральном диапазоне с длинами волн более 325 нм. Поэтому оптимальным диапазоном для исследования спектра коронного разряда в дневное и ночное время суток являются 250 – 325 и 250 – 400 нм.

Для исследования спектра в измерительном канале устройства (в УФ диапазоне спектра) предлагается использовать многоканальное матричное фотоприемное устройство (ФПУ) с размерами пикселя 24×24 мкм и их числом 512×4 . ФПУ должен обеспечивать широкий рабочий спектральный диапазон от 200 до 1200 нм и приемную площадку размерами $12,288 \times 0,096$ мм [6].

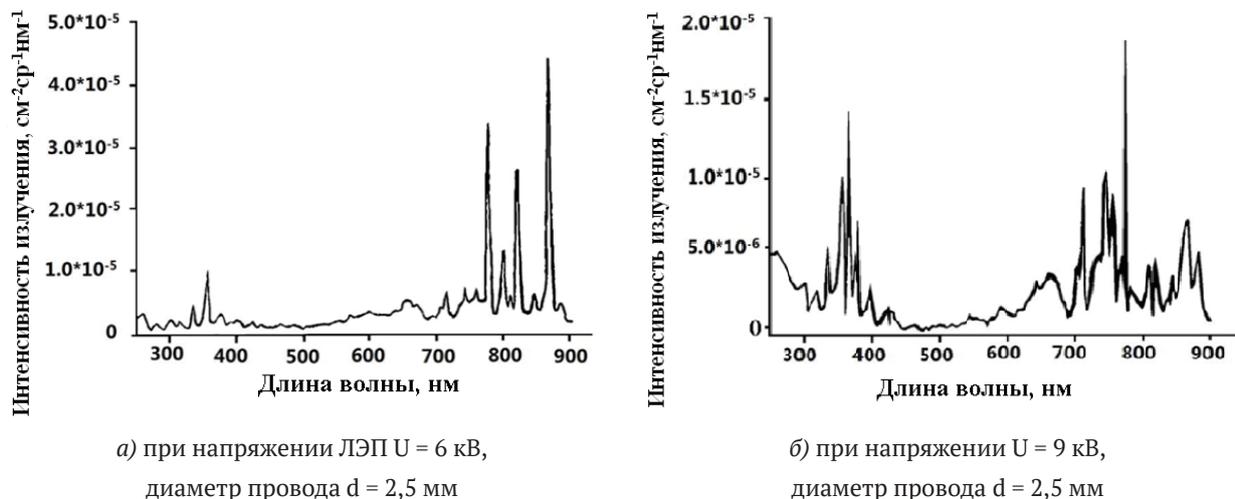


Рис. 1. Спектр излучения коронного разряда [5]

Наблюдательные каналы устройства с рабочими видимым и ИК диапазонами спектра должны быть оснащены соответственно фильтрами и матричными ФПУ, включая полосовые оптические фильтры ИК диапазона спектра толщиной 1 мм, выполненные из монокристаллического оптического германия, которые являются прозрачными в областях спектра 3–5 или 8–9 мкм [7].

Ранее для разрабатываемого устройства было предложено три варианта зеркального объектива типа Кассегрен [3]. С целью увеличения спектрального разрешения, получаемого в УФ диапазоне спектра, было решено провести оптимизацию оптических параметров зеркального объектива и ПВГДР.

Таблица 1. Параметры вариантов объектива типа Кассегрен

№ вар.	f , мм	D_1/D_2 , мм	Относительное отверстие	r_1 , мм	r_2 , мм	d , мм	k_1	k_2	Площадь рабочей поверхности, мм ²
1	220	40/14	1:5,6	100	46,081	32	-0,078	3,215	1218
2	261	60/20	1:4,4	80	28	28	-0,851	-1,000	2748
3	185	80/34	1:2,4	80	34	24	-0,838	-1,519	4800

В таблице 1 приняты следующие обозначения: f – фокусное расстояние объектива, D_1 и D_2 – диаметры апертур главного и вторичного зеркал соответственно, r_1 и r_2 – радиусы кривизны вершинных сфер главного и вторичного зеркал соответственно, d – расстояние между зеркалами, k_1 и k_2 – конические постоянные главного и вторичного зеркал соответственно.

Для оптимизированных вариантов объектива типа Кассегрен были рассчитаны ПВГДР с переменным шагом, их параметры указаны в таблице 2.

Таблица 2. Параметры вариантов ПВГДР с переменным шагом

№ вар. по таблице 1	Пространственная частота в центре, штр./мм	Дисперсия, нм/мм	Радиус пятна рассеяния, мкм
1	650	40	4,5
2	650	40	5,0
3	650	50	12,0

В таблице 3 приведены результаты численного моделирования, полученные при помощи программного обеспечения «OpticStudio Zemax», – значения радиусов пятен рассеяния для видимого и ИК диапазонов спектра, в которых сконцентрировано 80 % энергии.

Таблица 3. Результаты моделирования

№ варианта	Средняя длина волны, мкм			
	0,275	0,546	4,0	8,5
	Радиус пятна рассеяния, мкм			
1	4,5	6,0	40,0	90,0
2	5,0	5,0	31,0	67,0
3	12,0	6,0	18,0	39,0

В данной оптической схеме подложка ПВГДР представляет собой мениск с наибольшим световым диаметром 21 мм из флюорита (фтористого кальция) CaF_2 толщиной 1 мм по оптической оси [8]. Рельефно-фазовая дифракционная структура этой решетки изготавливается в два этапа. На первом этапе применяется классическая голографическая технология, в рамках которой с помощью двулучевого интерферометра в слое фоторезистора регистрируется интерференционная картина с последующей ее химической обработкой. Таким образом, формируется необходимая маска с заданной пространственной частотой. На втором этапе через полученную маску рельефно-фазовую дифракционную структуру переносят на поверхность подложки с помощью ионного травления. Данный технологический процесс может обеспечить получение дифракционной эффективности этой решетки в заданном УФ диапазоне спектра в первом порядке дифракции практически не менее 20 % от величины падающего в этом диапазоне потока излучения, при этом процесс характеризуется высокой воспроизводимостью основных оптических параметров изготавливаемых решеток.

Результаты моделирования в программе «OpticStudio Zemax» (таблица 3) показывают, что вариант объектива № 3 (по таблице 1) даёт лучшее качество изображения для наблюдательной ветви: для видимого диапазона спектра радиус пятна рассеяния равен 6,0 мкм, для среднего ИК диапазона спектра – 18,0 мкм и для дальнего ИК диапазона спектра – 39,0 мкм. Оптимизированная оптическая система с ПВГДР дает спектральное разрешение, равное 12,0 мкм в УФ диапазоне спектра для измерительной ветви, при этом по теореме Котельникова–Найквиста этого достаточно для выбранного ФПУ с размерами пикселя 24×24 мкм.

В результате выполненной работы был рассчитан вариант зеркального объектива типа Кассегрен, в котором по сравнению с вариантами, представленными в [3], были уменьшены значения радиусов пятен рассеяния в среднем ИК диапазоне спектра с 26,0 до 18,0 мкм и в дальнем ИК диапазоне спектра с 46,0 до 39,0 мкм при незначительном его увеличении в видимом диапазоне спектра с 3,4 до 6,0 мкм, что несильно снизит оптическое качество изображения наблюдаемых объектов. Для выделения излучения УФ диапазона спектра была использована ПВДР, которая позволила уменьшить радиус пятна рассеяния с 800,0 до 12,0 мкм, что сопоставимо с размерами пикселя представленных на рынке ФПУ матричного типа.

Список источников

- [1] Патент № 2737516 РФ. Устройство обнаружения и измерения электрического разряда высоковольтного оборудования / А. В. Лукин, А. Н. Мельников — Заяв. 09.01.2020. — Опубл. 01.12.2020.
- [2] Лукин, А. В. Трехдиапазонная оптическая система для устройства обнаружения электрического разряда высоковольтного оборудования / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Н. К. Павлычева, А. Н. Чеплаков // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. — 2021. — № 1. — С. 109–117.
- [3] Лукин, А. В. Зеркальный объектив для переносного устройства обнаружения и измерения электрического разряда в высоковольтном промышленном оборудовании и электрических сетях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Н. Чеплаков // HOLOEXPO 2021: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. — С. 219–222.
- [4] Лукин, А. В. Устройство обнаружения электрического разряда с возможностью исследования спектра в ультрафиолетовом диапазоне / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Н. К. Павлычева, А. Н. Чеплаков // XI международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сб. научных трудов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2022. — С. 543–544.
- [5] Liu, S. Research on ultraviolet detection of insulator corona discharge / S. Liu // 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, — 2014. — P. 1347–1352, DOI: 10.1109/ICMA.2014.6885895.
- [6] High-speed operation, back-thinned FFT-CCD / URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/image-sensor/ccd-cmos-nmos-image-sensor/line-sensor/for-scientific-measurement/S9037-0902.html>
- [7] РТМ 3–1640–83. Кристаллы германия оптические. Физико-химические свойства. — М.: ЦНИИ «Комплекс», 1983. — С. 14.
- [8] ОСТ 3–6304–87. Кристаллы фтористого кальция оптические. Технические условия. — М.: ЦНИИ «Комплекс», 1987. — С. 22.

Improving the device for diagnosing faults in high-voltage equipment

A. V. Lukin¹, A. N. Melnikov¹, N. K. Pavlycheva², A. N. Cheplakov^{1,2}

¹ JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

² Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

The report proposes an improved optical scheme for a device for remote diagnostics of faults in high-voltage equipment operating in 3 optical bands. Modeling and optimization of the parameters of a Cassegrain-type mirror lens and a transmissive concave fluorite hologram diffraction grating were carried out using the OpticStudio Zemax software. The optical parameters of the optimized optical scheme and their comparison with the original ones are provided in the report.

Keywords: Corona discharge, Diagnostic device, Optical scheme, Mirror lens, Diffraction grating, Optimization of optical parameters.