

Зеркальный объектив для переносного устройства обнаружения и измерения электрического разряда в высоковольтном промышленном оборудовании и электрических сетях

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

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

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

В докладе представлены варианты построения зеркального объектива типа Кассегрен, обеспечивающего работу переносного устройства обнаружения и измерения электрического разряда в трёх спектральных диапазонах: ультрафиолетовом (УФД), видимом (ВД) и инфракрасном (ИКД). Устройство предназначено для обнаружения и измерения интенсивности коронного разряда на изоляции высоковольтного оборудования и включает в себя две ветви — наблюдательную и измерительную. В наблюдательной ветви формируется изображение в ВД и ИКД, близкое к дифракционному качеству, а в измерительной ветви УФД — пятно рассеяния с размерами, соответствующими размерам площадки диодного фотоприемника. Разделение пучков излучения на разные спектральные диапазоны происходит с помощью дифракционной решётки и спектроделительной пластины.

Ключевые слова: устройство обнаружения и измерения, зеркальный объектив типа Кассегрен, анализ вариантов построения, дифракционная решётка, ультрафиолетовый диапазон, видимый диапазон, инфракрасный диапазон, электрический разряд.

Цитирование: 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, 2021. — С. 219–222.

Введение

Переносное устройство обнаружения и измерения электрического разряда в высоковольтном промышленном оборудовании и электрических сетях было предложено в [1]. Оно построено на основе применения зеркального объектива типа Кассегрен, имеющего фокусное расстояние $f' = 200$ мм и световой диаметр $D = 40$ мм. Цель данной работы — уменьшение габаритов оптической схемы при сохранении оптимального качества изображения и чувствительности измерений.

На рис. 1 представлена оптическая часть функциональной схемы устройства, описанного в [1]. Световой поток излучения проходит через зеркальный объектив 1 и поступает на пропускающую дифракционную решётку 2. В наблюдательной ветви световой поток излучения ВД и ИКД проходит дифракционную решётку 2 в нулевом порядке. Спектроделитель 3 пропускает световой поток излучения ВД, поступающий на фотоприёмное устройство

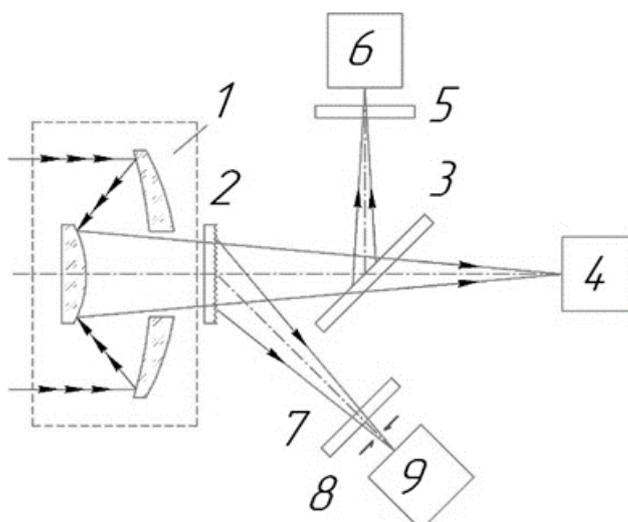


Рис. 1. Оптическая часть функциональной схемы переносного устройства обнаружения и измерения электрического разряда в высоковольтном промышленном оборудовании и электрических сетях (номера позиций приведены в тексте)

ВД (ФПУ ВД) 4, но отражает световой поток излучения ИКД, который проходит через светофильтр 5 и падает на ФПУ ИКД 6. В измерительной ветви световой поток излучения УФД проходит дифракционную решётку 2 в первом порядке, светофильтр 7, диафрагму 8 и падает на ФПУ УФД 9.

Пропускающая голограммная дифракционная решётка (ГДР) 2 выполнена на плоскопараллельной подложке из флюорита (CaF_2) толщиной 1 мм. Технологические методы изготовления ГДР могут обеспечить получение дифракционной эффективности этой решётки в УФД спектра в первом порядке дифракции не менее 20% от величины падающего в этом диапазоне потока излучения.

На первом этапе применяется классическая голографическая технология [2]: с помощью двухлучевого интерферометра в слое фоторезистора регистрируется интерференционная картина с последующей её химической обработкой, формируя необходимую маску с заданной пространственной частотой. На втором этапе с использованием полученной маски изготавливают рельефно-фазовую дифракционную структуру на рабочей поверхности подложки путём ионного травления [3].

Зеркальный объектив

Проведён расчёт и анализ вариантов построения зеркального объектива для рассматриваемого устройства, в котором по сравнению с [1] уменьшено фокусное расстояние f' объектива и увеличен его световой диаметр D :

- вариант 1: $f' = 200$ мм, $D = 40$ мм (исходный вариант);
- вариант 2: $f' = 175$ мм, $D = 60$ мм;
- вариант 3: $f' = 150$ мм, $D = 80$ мм.

Объектив типа Кассегрен можно представить в виде эквивалентной линзовой системы с положительным и отрицательным компонентами, схема которой представлена на рис. 2.

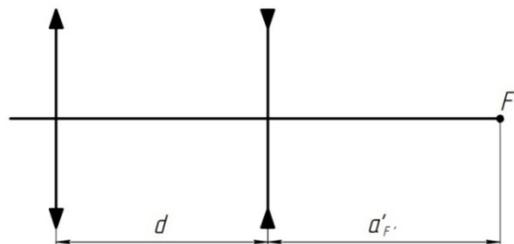


Рис. 2. Линзовая система, эквивалентная объективу типа Кассегрен

Табл. 1. Параметры вариантов объектива типа Кассегрен

№ вар.	$f, \text{ мм}$	$D, \text{ мм}$	Относительное отверстие	$r, \text{ мм}$	$f'_2, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	Световой диаметр главного зеркала, мм	Световой диаметр вторичного зеркала, мм	Площадь рабочей поверхности, мм ²
1	200	40	1:6,4	160	160	32	40	25,00	765,4
2	175	60	1:3,8	140	140	28	60	38,61	1665,8
3	150	80	1:2,9	120	120	24	80	51,48	2943,6

Поэтому расчёт параметров проводим по известным формулам (1) и (2).

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{1}{f'_1 f'_2}, \tag{1}$$

$$a'_{F'} = f' \left(1 - \frac{d}{f'_1} \right), \tag{2}$$

где f'_1, f'_2 — фокусные расстояния главного и вторичного компонентов соответственно,

$a'_{F'}$ — задний фокальный отрезок, включающий в себя расстояние между главным и вторичным компонентами и расстояние от главного зеркала до заднего фокуса объектива F' ,

d — расстояние между главным и вторичным компонентами.

В объективе типа Кассегрен отрицательное зеркало экранирует пучок лучей, падающий на положительное зеркало. Полезная площадь рабочей поверхности положительного зеркала определяется как разность между площадью главного зеркала и площадью, экранируемой отрицательным зеркалом. Из соотношений (1), (2) были определены значения f'_2 и d для различных значений f' , выбраны варианты, обеспечивающие минимальное центральное экранирование, которые приведены в табл. 1, где r — радиус кривизны зеркал.

Для улучшения качества изображения была введена асферичность для зеркал: для главного зеркала — параболическая форма, для вторичного — гиперболическая. Параметры асферичности приведены в табл. 2, где k_1, k_2 — конические постоянные для главного и вторичного зеркал соответственно.

Производство асферических поверхностей — трудоёмкий и сложный процесс, требующий высокоточных методов контроля, чему соответствует метод контроля асферических поверхностей с помощью осевых синтезированных голограмм [4].

Табл. 2. Параметры асферичности зеркал

№ варианта	k_1	k_2
1	-1	-5,452
2	-1	-5,453
3	-1	-5,456

Табл. 3. Результаты моделирования

№ варианта	Средняя длина волны, мкм			
	0,275	0,546	4,0	8,5
Радиус пятна рассеяния, мкм				
1	405,0	8,0	60,0	125,0
2	620,0	5,0	37,0	80,0
3	800,0	3,4	26,0	46,0

В табл. 3 приведены полученные в процессе численного моделирования в среде Zemax значения радиусов пятен рассеяния, в которых сконцентрировано 80% энергии.

Результаты моделирования показывают, что вариант № 3 построения зеркального объектива типа Кассегрен даёт лучшее качество изображения для наблюдательной ветви и приемлемое значение радиуса пятна рассеяния для измерительной ветви, что соответствует параметрам доступных на рынке ФПУ матричного типа [5] и ФПУ УФД [6].

Заключение

В результате выполнения работы был выбран вариант зеркального объектива типа Кассегрен, в котором уменьшено фокусное расстояние с 200 до 150 мм, а относительное отверстие увеличено с 1:6,4 до 1:2,9, что позволяет уменьшить габариты переносного устройства обнаружения и измерения электрического разряда. При этом разработанная оптическая система обеспечивает качество изображения в наблюдательной ветви (пределы разрешения: в видимом диапазоне — 0,0034 мм, в инфракрасных диапазонах: 0,026 и 0,046 мм), сопоставимое с разрешением представленных на рынке ФПУ матричного типа. Численное моделирование измерительной ветви показало, что световые размеры приёмной площадки фотоприёмника должны составлять не менее 11 мм², что соответствует световым размерам имеющегося на рынке фотодиода, работающего в ультрафиолетовом диапазоне. Наличие ФПУ ультрафиолетового диапазона открывает возможность проведения измерений электрических разрядов.

Список источников

- [1] **Патент № 2737516 РФ.** Устройство обнаружения и измерения электрического разряда высоковольтного оборудования / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Опубл. 01.12.2020.
- [2] **Palmer, C.** Diffraction Grating Handbook / C. Palmer. — N. Y. : Newport Corporation. — 2014. — P. 265.
- [3] Справочник технолога-оптика / Под ред. М. А. Окатова. — СПб. : Политехника, 2004. — 679 с.
- [4] **Белозёров, А. Ф.** Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть 1 / А. Ф. Белозёров, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Фотоника. — 2014. — № 4. — С. 12–32.
- [5] **Торшина, И. П.** Выбор приёмника излучения при проектировании оптико-электронного прибора / И. П. Торшина, Ю. Г. Якушенков. — М. : МИИГАиК, 2017. — 58 с.
- [6] Компания «Sglux»: Каталог продукции, модель фотодиода «SG01XXL-8ISO90» / URL: sglux.de/en/produkt/sg01xxl-8iso90-en.