

42. Волновой фронт: некоторые вопросы его восстановления и формообразования в голографии и дифракционной оптике

А. В. Лукин

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе рассмотрены вопросы формообразования и преобразования волновых фронтов в голографии и в дифракционной оптике. На простейших примерах проиллюстрированы схожесть и различие в физической сущности процессов формирования волновых полей вблизи фокальной плоскости одиночной классической и дифракционной (голограммной) линзы для непрерывного и моноимпульсного лазерного излучения. Предложена обобщенная формулировка теорем Малюса и Леви-Чивита.

Ключевые слова: Фронт световой волны, Скорость света, Длина световой волны, Принцип Гюйгенса — Френеля, Восстановление волнового фронта, Дифракционная оптика, Голография, Дифрагированный луч.

Цитирование: Лукин, А. В. Волновой фронт: некоторые вопросы его восстановления и формообразования в голографии и дифракционной оптике / А. В. Лукин // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 222–225.

В связи с разработкой новых государственных стандартов по различным направлениям оптики и фотоники предлагается обратить внимание научного оптического сообщества на необходимость уточнения некоторых формулировок содержащихся в них терминов.

Дифракционная (голограммная) и асферическая технологии обеспечивают формирование и развитие важнейших составляющих элементной базы современного оптико-электронного приборостроения и их значимость непрерывно возрастает. При этом имеет место полезное и эффективное их взаимодействие. Так, в частности, на основе использования осевых синтезированных голограмм в качестве оптических образцов и нуль-корректоров найдены кардинальные решения проблем контроля с интерферометрической точностью практически всех видов асферики, технологического и аттестационного контроля процессов сборки и юстировки объективов и телескопических систем различного назначения [1]. С другой стороны, изготовление, например, дифракционных решеток на асферических рабочих поверхностях позволяет существенно улучшить абберационные и габаритно-массовые характеристики спектральной аппаратуры космического базирования [2].

Очевидное, но принципиальное отличие дифракционных и голограммных оптических элементов (ДОЭ, ГОЭ) от их классических аналогов состоит в том, что «традиционные» линзы и зеркала преобразуют конгруэнции оптических лучей от источника света только за счет преломления и/или отражения, а ДОЭ и ГОЭ — исключительно за счет дифракции. При этом процессы преломления и отражения хотя и имеют здесь место, но участвуют лишь в осуществлении пространственной фазовой и/или амплитудной модуляции исходной волны, падающей

на дифракционную структуру ДОЭ и ГОЭ, и не влияют на угловые характеристики конгруэнции дифрагированных лучей.

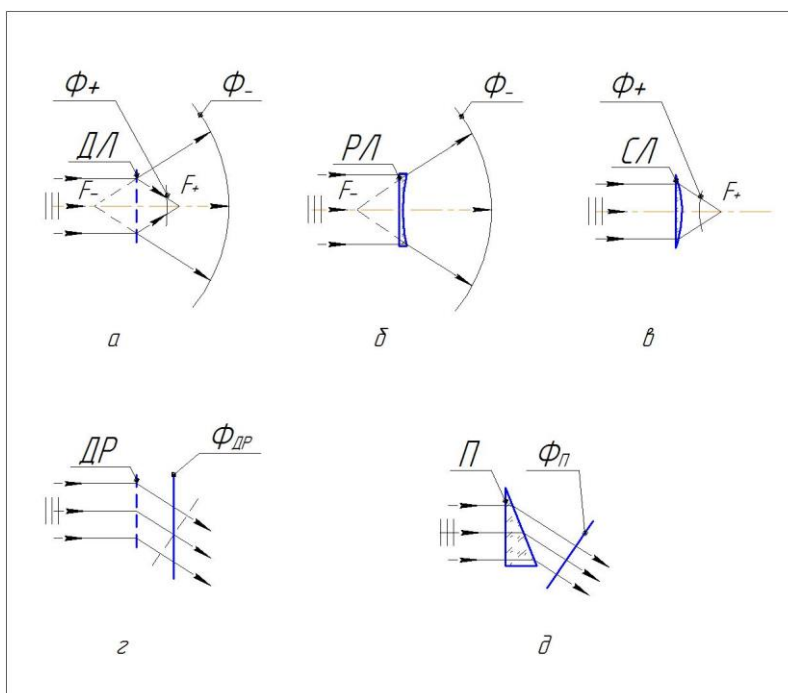
Следует отметить, что принципиальной физической основой «правомерности» реализации свойств дифракционной оптики, по нашему мнению, являются теоремы Малюса («Нормальная прямолинейная конгруэнция световых лучей остается нормальной после любого числа преломлений и отражений») и Леви-Чивита («Две любые нормальные прямолинейные конгруэнции световых лучей можно перевести друг в друга с помощью одного преломления или отражения») [3], обобщенные на случай дифракции [4].

Рассмотрим главные отличительные особенности дифрагированных волн. Прежде всего коснемся термина «волновой фронт» [5]. В данном случае его следует понимать только как поверхность, ортогональную к дифрагированным лучам («геометрический» волновой фронт — область нормальной прямолинейной конгруэнции лучей [3]). На эти обстоятельства до сих пор в литературе не обращалось сколько-нибудь значимого внимания, несмотря на то что, например, вся голографическая интерферометрия зиждется на признании «де-факто» справедливости этого положения (см., например, [6]).

Отсюда следует, в частности, что одиночная голограмма в силу нарушения условия изохронности (принципа равного оптического пути [3]) не способна «восстанавливать», «преобразовывать» или «делить» волновой фронт в прямом смысле этого термина, который определяется как «геометрическое место точек, до которых в данный момент дошло световое возмущение» [5]. Другими словами, фронт световой волны — это пограничная волновая поверхность, отделяющая возмущенную среду от среды невозмущенной и передвигающаяся со скоростью света. Это различие, несущественное при работе с непрерывными и импульсно-периодическими источниками излучения с относительно большой длительностью импульсов или с малой длительностью импульсов, но с высокой стабильностью периода их следования, может заметно сказаться на характере распределения интенсивности светового поля, например, в кружке наименьшего рассеяния при использовании ДОЭ или ГОЭ в оптических системах с ультракороткими импульсными источниками света с относительно большим периодом следования, например, в лазерных дальномерах [7, 8]. К этому следует добавить, что не очень ясно, и как адаптировать принцип Гюйгенса — Френеля к построению волнового фронта дифрагированной волны.

Однако, как убедительно свидетельствует практика, в подавляющем большинстве случаев нормальная прямолинейная конгруэнция дифрагированных лучей позиционируется так же, как соответствующие конгруэнции преломленных или отраженных лучей [3, 4, 6]. Именно это обстоятельство и является основополагающим во всех применениях ДОЭ и ГОЭ, осуществляющих определенные виды преобразований световых пучков в различных типах оптико-электронных приборов и устройств.

Рисунок иллюстрирует сущность этого различия на примере преобразования фронта плоской монохроматической волны дифракционными (a, z) и классическими ($b, в, d$) оптическими элементами.



В ± 1 -х рабочих порядках, стеклянной рассеивающей линзой (РЛ), стеклянной собирающей линзой (СЛ), дифракционной решеткой (ДР) и призмой (П); на рисунке 1г пунктиром обозначен геометрический фронт плоской дифрагированной волны

Рис. 1. Принцип формирования волновых фронтов дифракционной линзой (ДЛ)

Видно, что одиночная дифракционная (голограммная) линза способна формировать лишь расходящийся сферический волновой фронт, а у дифракционной решетки, в отличие от призмы, плоский волновой фронт параллелен самой решетке.

С учетом вышеизложенного, теоремы Малюса и Леви-Чивита целесообразно представить в следующем обобщенном виде:

Любые два волновых фронта могут быть преобразованы один в другой с помощью одного отражения, преломления или дифрагирования, причем в случае дифрагирования преобразованный волновой фронт следует понимать только как геометрический.

При этом отражающие и преломляющие поверхности, как правило, должны иметь асферическую форму, что в случае ДОО и ГОЭ эквивалентно соответствующему пространственному распределению штрихов их дифракционной структуры.

В заключение отметим, что приведенные выше рассуждения будут полезны при уточнении терминологии по голографии и дифракционной оптике, а также по лазерам и лазерным технологиям с учетом самого замечательного и по-прежнему весьма таинственного свойства света — его дуализма.

Список источников

- [1] Белозёров, А. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть I / А. Белозёров, Н. Ларионов, А. Лукин, А. Мельников // Фотоника. — 2014. — № 4. — С. 12–32.
- [2] Павлычева, Н. К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками / Н. К. Павлычева. — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. — 198 с.

- [3] **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. — М.: Наука, 1970. — С. 158–161, 856–859.
- [4] **Лукин, А. В.** Голограммные оптические элементы / А. В. Лукин // Оптический журнал. — 2007. — Том 74. — № 1. — С. 80–87.
- [5] **Физическая оптика.** Терминология. Вып. 79. — М.: Наука, 1970. — С. 365–366.
- [6] **Кольер, Р.** Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лиин. — М.: Мир, 1973. — С. 175–189.
- [7] **Caulfield, H. J.** Propagation of ultrashort pulses through lenses / H. J. Caulfield, T. Hirschfeld. // Appl. Opt. — 1977. — Vol. 16. — № 5. — P. 1161–1183.
- [8] **Крюков, П. Г.** Лазеры ультракоротких импульсов / П. Г. Крюков // Квантовая электроника. — 2001. — Том 31. — № 2. — С. 95–119.