

07;12

Эффект формирования негативного изображения непрозрачным экраном

© Ш.Д. Какичашвили

Институт кибернетики АН Грузии, Тбилиси

Поступило в Редакцию 24 ноября 1998 г.

В работе описан эффект, который может послужить основанием для согласования двух подходов в описании дифракции по Френелю и по Юнгу.

Первые упоминания о фокусирующем действии камеры-обскуры, по-видимому, относятся к XVI веку [1]. Формирование этим устройством изображения практически полностью описывается законами лучевой оптики. Аналогичное действие круглого непрозрачного экрана и непрозрачного шара для своего объяснения требует привлечения волновой теории света и использования принципа Гюйгенса–Френеля [2]. Соответствующий эксперимент выявляет значительную критичность относительно геометрии опыта и точности выполнения кругового экрана [3]. Как и в камере-обскуре, изображение оказывается перевернутым и позитивным [4].

Много лет назад автор наблюдал, по-видимому, ранее не привлечший внимание эффект формирования негативного изображения малым непрозрачным экраном. Используя протяженный источник света в виде накальной нити произвольной конфигурации, пламени свечи и т.п. и поместив на пути света непрозрачный экран небольших размеров ($\leq 1 \div 2 \text{ mm}$), начиная с некоторых расстояний легко наблюдать негативное изображение источника. Сформированное изображение не критично относительно формы непрозрачного экрана (круг, треугольник, квадрат и т.п.) и, так же как и в камере-обскуре, перевернуто (рис. 1). Чем меньше размеры экрана, тем контрастнее и четче изображение даже относительно близких от экрана расстояниях. Описанный (элементарный по своей сути) эксперимент практически не критичен относительно условий проведения и геометрии опыта. Все усилия автора объяснить наблюдаемый эффект даже на качественном уровне посредством мате-

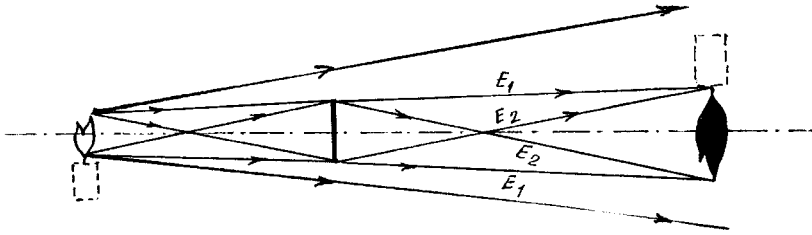


Рис. 1. К формированию негативного изображения протяженного источника прозрачным экраном.

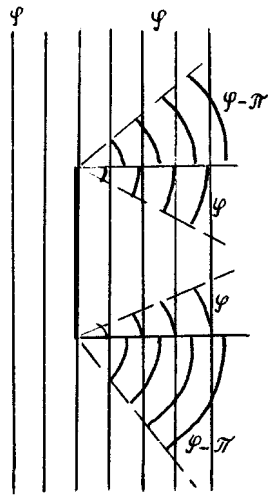


Рис. 2. К иллюстрации скачка фазы конической волны Юнга с двух сторон прозрачного экрана.

матического аппарата, основанного на принципе Гюйгенса–Френеля, не привели к успеху.

В предлагаемой работе для этой цели использована дифракционная идея Юнга, которая считается в определенном смысле альтернативной принципу Гюйгенса–Френеля. Вместо вторичных волн сферической

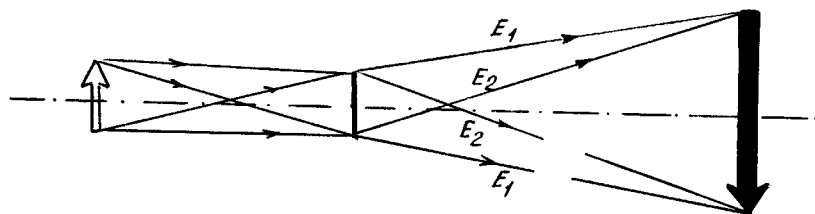


Рис. 3. Схема формирования негативного изображения непрозрачным экраном.

конфигурации Юнга постулировал возникновение т.н. конических волн, отраженных краем дифрагирующего отверстия по обе стороны от этого края. Коническая волна совместно с непосредственно прошедшей волной вследствие их интерференционного сложения образует картину дифракции. При этом на самом крае имеет место разрыв амплитуды. Для ее компенсации Юнг постулирует возникновение скачка фазы на π для части конической волны, отклоненной в область исходной волны, и отсутствие скачка для другой ее части, отклоненной в область тени (см. рис. 2) [5].

На рис. 3 изображена схема формирования негативного изображения непрозрачным экраном. Здесь $E = E_0 \exp i(\omega t + \varphi)$ — исходная, освещающая волна. Согласно Юнгу, конические волны, соответственно, для внешней и внутренней частей непрозрачного экрана в параксиальном приближении можно записать в виде:

$$E_{\text{вн}} = k_{\text{вн}} \cdot E \exp -i\pi, \quad E_{\text{вт}} = k_{\text{вт}} \cdot E, \quad (1)$$

где коэффициенты $k_{\text{вн}}$ и $k_{\text{вт}}$ описывают падение амплитуды конической волны вне тени и в области тени соответственно. Эти коэффициенты связаны с материальной природой непрозрачного экрана и в общем случае могут быть не равны друг другу. Сложив волны (1) и вычислив интенсивность результирующего поля, получим:

$$I_{\Sigma} = (E_{\text{вн}} + E_{\text{вт}})(E_{\text{вн}} + E_{\text{вт}})^* = E_0^2(k_{\text{вн}} - k_{\text{вт}})^2. \quad (2)$$

Полагая, согласно Рубиновичу [5], $k_{\text{вн}} = k_{\text{вт}}$, имеем для результирующей интенсивности $I_{\Sigma} = 0$, что однозначно описывает возникновение негативного изображения источника.

Следует отметить, что процесс формирования изображения камерой-обскурой также не вступает в противоречие с дифракционной идеей Юнга. В этом случае в формировании изображения принимают участие три волны: неотклоненная с амплитудой пропорциональной площади отверстия $E_H = kE$ и две внешние относительно тени волны $E_{ВШ}$. В условиях таутохронизма складываемых волн, что имеет место при бесконечно больших расстояниях от объекта до отверстия и от отверстия до места формирования изображения, и полагая $k = k_{ВШ}$, имеем для интенсивности результирующего поля:

$$I_{\Sigma} = (kE + 2E_{ВШ})(kE + 2E_{ВШ})^* = k^2 E_0^2. \quad (3)$$

При отличных от этого условиях геометрии опыта сформированное изображение отягощено значительными дифракционными шумами, что легко наблюдается в эксперименте [1].

Аналогичный эффект формирования негативного изображения автор наблюдал также при использовании небольшой фазовой ступеньки произвольной глубины, а также анизотропно поглощающего экрана в виде 1 mm кусочка пленочного поляризатора. Круглый образец пленочного поляризатора помещался между двух стекол совместно с иммерсионной жидкостью с коэффициентом преломления близким стеклу и материалу образца. При освещении светом линейной поляризации с направлением колебаний электрического вектора параллельным оси пропускания образца контраст негативного изображения резко уменьшался. Для освещающего света ортогональной поляризации контраст негативного изображения оказывается максимальным и близким к контрастности при непрозрачном экране. Последний эксперимент однозначно свидетельствует, что участие в создании изображения принимают две волны $E_{ВШ}$ и $E_{ВТ}$. Более точные количественные измерения контрастности изображения, по-видимому, могут быть использованы для определения коэффициентов $k_{ВШ}$ и $k_{ВТ}$ для поглощающих экранов различной материальной природы.

Полную теорию наблюдаемого эффекта предполагается опубликовать в дальнейшем.

Описанный в данной работе эффект, по мнению автора, может послужить основанием для согласования двух, казалось бы альтернативных подходов в описании дифракции, — по Френелю и по Юнгу.

Как известно, дифракционная идея Юнга в самом общем виде заключается в постулировании поперечной диффузии амплитуды за пределами

дифрагирующего отверстия. При этом, расплывание амплитуды поля может быть описано аналогично диффузии тепла согласно соответствующему уравнению теплопроводности. Последнее, как известно, имеет значительное сходство с волновым уравнением Шредингера. При этом, диффузия комплексной амплитуды должна происходить со сдвигом фаз, аналогично сдвигу фаз, эвристически введенного Юнгом для фаз конической волны. Вследствие этого должны возникать осцилляции в распределении амплитуды по фронту и для любых точек наблюдения.

Как известно, принцип Гюйгенса–Френеля не вводит каких-либо специальных условий в связи с фазами вторичных волн. Однако этот подход не позволяет даже приближенно описать наблюдаемый в предлагаемой работе эффект.

Оба подхода по своей сути являются скалярными, не позволяя применить их для описания дифракции электромагнитных волн на экранах анизотропного и гиротропного профиля. Из сказанного однозначно следует, что в будущем необходима модификация обоих подходов применительно к векторным волнам электромагнитного поля. На сегодня представляется, что векторная модификация принципа Гюйгенса–Френеля применительно к голографии [6,7], несмотря на обширный круг описываемых явлений, является недостаточно общей. Будущая модифицированная теория не должна будет нуждаться в независимом, эвристическом введении в теорию как принципа Гюйгенса–Френеля, так и идеи интенференции включая их в свой аппарат в качестве математических следствий.

Автор благодарит Д.Ш. Какичашвили и проф. Е.М. Любимова за интерес к работе и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Толанский С. Удивительные свойства света. М.: Мир, 1969. 136 с.
- [2] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
- [3] Поль Р.В. Оптика и атомная физика. М.: Наука, 1966. 552 с.
- [4] Зоммерфельд А. Оптика. М.: ИЛ, 1953. 486 с.
- [5] Rubinowicz A. // Nature. 1957. V. 180. P. 160–162.
- [6] Денисюк Ю.Н. // ДАН СССР. 1962. Т. 144. № 6. С. 1275–1278.
- [7] Какичашвили Ш.Д. Поляризация голография. Л.: Наука, 1989. 142 с.