

07

Кольцевидные лазерные спеклы

© Ю.В. Васильев, А.В. Козарь, Е.Ф. Курицына, А.Е. Лукьянов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
199899 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 19 марта 1997 г.)

Явление дифракции гауссова пучка лазерного излучения на прямолинейном крае полубесконечного металлического экрана характеризуется рядом особенностей, которые обусловлены краевой природой дифрагировавшего излучения. Хотя основные процессы трансформации волнового фронта происходят в ближайшей окрестности края, тем не менее о них принято судить по различным оптическим явлениям, которые наблюдаются на достаточно большом удалении. Например, смещение края экрана с диаметром пучка, падающего перпендикулярно на плоскость экрана, приводит к максимуму дифракционного рассеяния лазерного излучения, в результате чего глаз наблюдателя отчетливо видит на краю экрана яркий, "самосветящийся" отрезок прямой линии. Объективная же регистрация рассеянного излучения с помощью листа фотобумаги и т.п. убеждает, что дифрагировавшее излучение расходится от "самосветящегося" отрезка по различным пространственным направлениям с неодинаковой интенсивностью. По направлениям преимущественно вперед оно сложным образом структурируется, причем его тонкая структура обязана возникновению анизомерных лазерных спеклов. Структурирование вызвано крупномасштабной и мелкомасштабной пространственной модуляцией волнового фронта вследствие неизбежных локальных отклонений профиля реального края экрана от строгой прямолинейности [1].

В настоящей работе сообщается о возможности существования более сложной, ультрамелкомасштабной, модуляции волнового фронта. С ней пришлось столкнуться при исследовании структуры кольцевидных лазерных спеклов, которые были нами обнаружены и объективно зарегистрированы в дифракционных экспериментах на голографической измерительной установке УИГ-22М.

Аргонный лазер типа ЛГН-503 непрерывно генерирует монохроматическое излучение в виде гауссова пучка (пространственная мода TEM_{00} , эффективный диаметр 2.5 мм, длина волны 488 нм). Пучок падает перпендикулярно на плоскость дифракционного экрана, которым служит плоское стальное лезвие для безопасной бритвы толщиной 80 мкм. Дифракция происходит на вертикально ориентированном прямом заостренном крае лезвия, совмещенном с диаметром пучка, в котором колебания электрического вектора падающей волны параллельны краю. Заостренному краю длиной 37 мм придана двусторонне симметричная, клиновидная форма с характерным размером стороны порядка 1 мм.

Как показывают детальные микроскопические исследования лезвия в растровом электронном микроскопе JSM-U3 (максимальное увеличение на экране 10 000 раз, разрешающая способность 20 нм), вершиной предполагаемого клина вовсе не является геометрически идеальное, бесконечно тонкое ребро. На самом деле реальный край завершается очень узкой площадкой — режущей кромкой, средняя ширина которой 300 нм. Этот факт иллюстрирует рис. 1, где приведен типичный фрагмент заостренного края лезвия (вид сбоку) при обзоре объекта на площади в кадре $33 \times 33 \mu\text{m}$. Микрофотография получена в камере фотоприставки микроскопа при его работе в режиме увеличения 3000.

На рис. 1 режущая площадка лезвия предстает в виде сплошной черной полосы, идущей в средней части кадра слева направо под углом к горизонту. Выше и ниже ее видны оба склона клиновидного края, со своими индивидуальными микродефектами поверхности. Оба ребра, по которым проходит резкая граница режущей площадки с соответствующим склоном, независимым друг от друга образом изменяют свои локальные направления в пространстве. Это говорит о том, что вдоль лезвия локальная толщина кончика края хаотически флуктуирует. Измерения в микроскопе показывают, что вариации толщины кончика края в основном лежат в диапазоне от 100 до 500 нм.

По-видимому, это обстоятельство сказывается на оптических явлениях при больших углах дифракции, когда влияние крупномасштабной модуляции волнового фронта уже несущественно и на первый план выходят все возмущения порядка длины волны лазерного излучения.

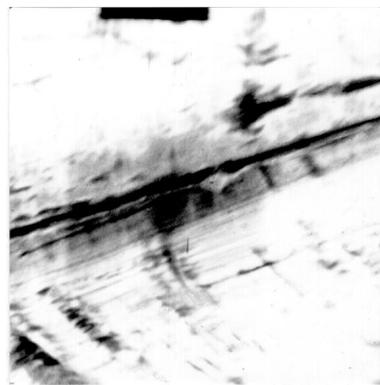


Рис. 1. Микроструктура кончика края клиновидно заостренного лезвия (вид сбоку).



Рис. 2. Системы лазерных спеклов поверхностного и краевого происхождения в негативном изображении. Плоскость листа фотобумаги перпендикулярна прямому заостренному краю лезвия, расстояние от центра освещенного участка края до листа 5 см.

Поэтому в эксперименте фотографическая рамка установки УИГ-22М помещается в горизонтальном положении ниже лезвия на расстоянии L по вертикали от центра освещенного участка заостренного края. На плоском листе фотобумаги объективно регистрируется распределение освещенности в окне рамки (при различных экспозициях и интересующем значении L). Например, на рис. 2 показана одна из зарегистрированных оптических картин распределения освещенности при $L = 5$ см (негативное изображение).

Здесь выделяются две области зарегистрированных лазерных спеклов. В нижней части рисунка — со стороны плоскости лезвия, освещенной лазерным пучком, а в верхней — с теневой стороны. Нижняя часть, практически полностью засвеченная при выбранной экспозиции, в основном несет информацию о шероховатости металлической поверхности, которая диффузно рассеивает когерентное излучение лазерного пучка в полупространство [2]. Верхняя часть рисунка демонстрирует систему кольцевидных лазерных спеклов, порожденную всеми видами хаотической микроскопической нерегулярности кончика заостренного края лезвия при рассеянии лазерного излучения. О краевой природе кольцевидных спеклов свидетельствует, во-первых, их концентрическое расположение относительно следа мысленного продолжения прямого края лезвия на плоскость листа и, во-вторых, обнаруженный эффект затенения этой системы спеклов склоном клиновидного края, дальним по отношению к лазерному источнику. Он проявляется в виде треугольного разрыва между поверхностными и краевыми спеклами в левой части рис. 2. Видно, что этот разрыв расширяется линейно вверх, начиная от центра кольцевидных спеклов. В правой же части рисунка, напротив, происходит наложение обеих систем спеклов.

Самым удивительным экспериментально обнаруженным фактом оказывается существование максимума интегральной интенсивности системы кольцевидных спеклов именно по направлению вдоль границы области наложения обеих систем спеклов в правой части рисунка, тогда как по направлению вверх от центра кольцевидных спеклов, т.е. вдоль пути распространения прошедшей части пучка за экраном, их интегральная интенсивность оказывается меньше, она становится уж совсем малой по направлениям в левой верхней части рисунка, за теневой стороной лезвия. Этот (и не рэлеевский, и не квазизеркальный) тип рассеяния, который проявляется при образовании системы кольцевидных спеклов, позволяет предположить важную роль импедансного вклада в механизме рассеяния за счет конечной величины проводимости материала экрана, толщина которого вблизи кончика края локально бывает меньше длины волны падающего когерентного излучения, причем в несколько раз.

Список литературы

- [1] Васильев Ю.В., Козарь А.В., Курицына Е.Ф., Лукьянов А.Е. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 14. С. 29–32.
- [2] Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.