

07; 12
©1993

ЯВЛЕНИЕ СТРАТИФИКАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ДИФРАГИРОВАВШЕГО НА КРАЮ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЭКРАНА

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

В современных оптических исследованиях явления дифракции широко практикуется использование когерентных гауссовых пучков света, генерируемых лазерными источниками. В частности, в работах [1,2] специальная оптическая система формировала очень узкий гауссов пучок для освещения малого фрагмента только одного прямого края тонкой металлической цилиндрической нити. Эти исследования убедительно показали краевую природу обнаруженного в области геометрической тени (ОГТ) "хвоста" интенсивности рассеянного поля, причем было обращено внимание на отсутствие в нем какой-либо пространственной структуры. Последнее позволило ограничиться изучением одномерной интегральной зависимости интенсивности I дифрагировавшего света от угла наблюдения φ за краем экрана: $I = I(\varphi)$.

В настоящее время краевая природа оптического поля, дифрагировавшего на краю металлического экрана, не вызывает сомнений. Естественно ожидать, что в ОГТ при определенных условиях она должна каким-то образом сказываться на структуре формируемой оптической картины. Поэтому в общем случае при работе с лазерными пучками полезно, кроме рассмотрения зависимости $I(\varphi)$, обратиться к более детальному исследованию пространственной зависимости интенсивности дифрагировавшего света вида $I = I(x, y, z)$. Это диктуется потребностями практики, а такая ситуация типична для ряда приложений, например лазерного экспресс-анализа состояния режущей кромки металлических инструментов, применяемых в медицине, технике и быту. Здесь в отличие от рассмотренного случая использования очень узких пучков света представляют интерес пучки с широкой апертурой.

В нашей работе сообщается о явлении пространственного структурирования дифрагировавшего излучения в ОГТ, которое обнаруживается при переходе от узких к широким освещающим пучкам. Оно сильно зависит как от апертуры гауссова пучка, так и микроструктуры края экрана.

На голографической измерительной установке УИГ-22М проведено исследование явления структурирования при дифракции когерентного света на краю полубесконечного металлического экрана: использованы различные плоские лезвия для безопасных бритв отечественного производства для технических и бытовых целей. Аргонный лазер типа ЛГН-503 генерировал непрерывное одномодовое излучение с длиной волны $\lambda = 488$ нм в виде гауссова пучка с эффективным диаметром 2.5 мм и угловой расходимостью

1 мрад. Мощность пучка можно было плавно изменять до нескольких сотен мВт. Исследования проводились при распространении в положительном направлении оси z излучения, пучок которого на расстоянии 0.3 м от лазера падал нормально на плоское лезвие ($z = 0$). Для достижения максимума дифрагировавшего света режущая кромка лезвия устанавливалась точно посередине освещающего пучка. Считается, что ось y совпадает с кромкой лезвия и диаметром пучка, а координата x характеризует удаление точки наблюдения в ОГТ от ее границы.

Визуальные наблюдения из любой точки (x, y, z) показывают, что участок края в апертуре освещающего пучка как бы сам светится в виде отрезка прямой линии длиной в несколько миллиметров, причем яркость свечения спадает от середины к краям отрезка. Можно считать, что край лезвия является источником широко расходящегося во все стороны веера лучей света. Его структуру удобно исследовать с помощью вспомогательного плоского экрана, который можно произвольно перемещать и ориентировать в пространстве. Для анализа распределения освещенности по площади экрана был использован метод последовательных срезов локальной освещенности по пороговым уровням. Для этого на высококонтрастной фотобумаге в плоскости экрана производилась фотосъемка (при необходимости — при различных экспозициях), обработка в контрастном проявителе и монтаж снимков.

Если плоскость экрана установить почти перпендикулярно плоскости лезвия, но параллельно светящемуся краю, то можно увидеть широко расходящийся веер освещенных участков экрана. Наибольшей освещенностью обладает центральный луч веера. При плавном движении вдоль оси y края лезвия можно наблюдать процесс расщепления этого луча на веер более тонких, но достаточно ярких лучей, которые то раскрываются на небольшой угол, то снова сливаются.

Если плоскость экрана установить на большом расстоянии z параллельно плоскости лезвия, то можно обнаружить два различных типа структурирования центрального луча дифрагировавшего света. В качестве примера на рис. 1 показан первый тип структурирования. Здесь представлен монтаж отдельных фотографий (негативов) с номерами i в плоскости $z = 3$ м в ОГТ при постоянной экспозиции, начиная с первого положения при $x = 10$ см через равные интервалы $\Delta x = 10$ см. Всем белым участкам снимков соответствует освещенность ниже фиксированного порогового уровня, а темным — выше его. Видно, что с удалением в ОГТ сравнительно широкие центральные черные линии постепенно расходятся в виде веера. Здесь показаны случаи слабого (a) и более сильного расхождения (b), которым соответствует освещение двух различных участков кромки одного и того же лезвия.

Второй тип структурирования осуществляется несколько по иной схеме — сначала центральные линии как бы сходятся и пересекаются, а затем с ростом x вновь расходятся. Все это говорит о том, что в данной фиксированной апертуре освещения край лезвия не является строго прямой линией, т.е. он характеризуется крупномасштабными неровностями. Их длина значительно превышает длину волны света λ , а геометрия края описывается некоторой случайной функцией $x = x(y)$.

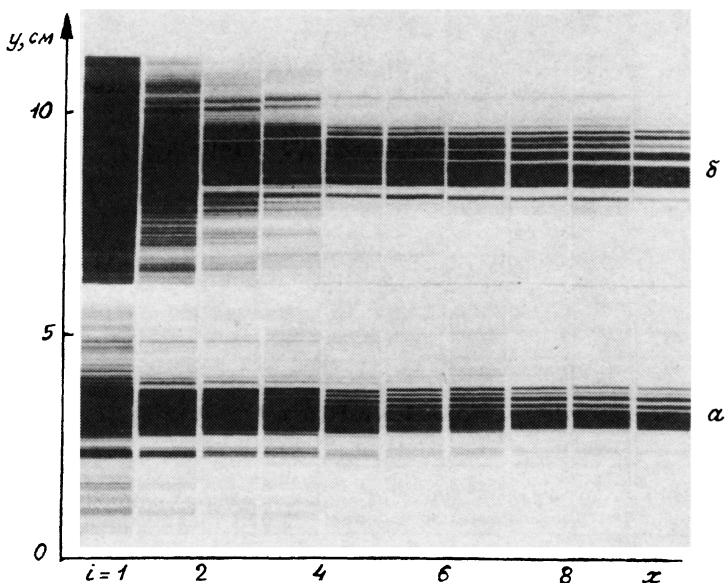


Рис. 1. Монтаж фотографий (негативов), показывающих сложный характер пространственного распределения в области геометрической тени интенсивности когерентного света, дифрагировавшего на заостренном прямом крае плоского стального лезвия для безопасной бритвы.

В эксперименте также обнаружено и мелкомасштабное структурирование дифрагировавшего излучения. На рис.1 оно представлено совокупностью очень узких, почти параллельных черных линий, которые в некоторых местах группируются, образуя параллельные страты. Анализ их взаимного расположения убеждает, что здесь нет какого-то строгого закона появления узких линий на экране, но тем не менее в стратах с их небольшой шириной Δy удастся определить среднюю пространственную частоту следования узких линий, которая может меняться от 1–2 линий на миллиметр до 4 во всем исследованном на экране диапазоне изменения координаты y , равном 12 см.

Использование голографического приема наложения дополнительного опорного пучка позволило по образующимся интерференционным картинам установить, что фазы узких линий различных стратов в пределах страта изменяются закономерно, но для различных стратов их фазы распределены хаотично. Вся перечисленная совокупность признаков позволила идентифицировать обнаруженное мелкомасштабное структурирование дифрагировавшего излучения как проявление специфической картины образования так называемых лазерных спеклов [3]. Физически они обусловлены высокой когерентностью освещающего лазерного света и случайной мелкомасштабной микроструктурой заостренного края лезвия во всей широкой апертуре гауссова пучка.

Лазерный свет, рассеянный любой точкой освещенного участка края лезвия, распространяется в виде сферической волны до точки наблюдения на экране, где он интерферирует со светом от всех

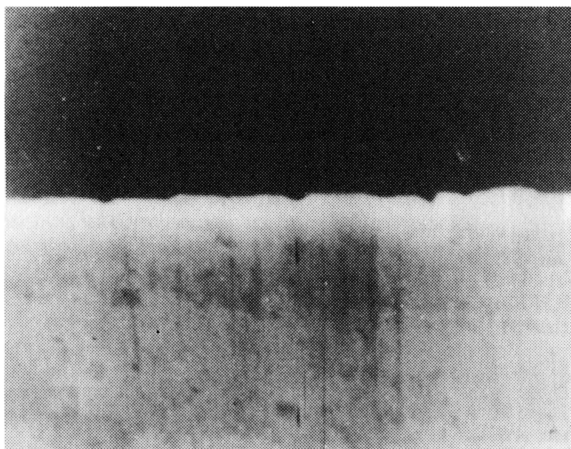


Рис. 2. Микрофотография участка края лезвия длиной 33 мкм в растровом электронном микроскопе JSM-U3 при увеличении $\times 3000$. Видны микродефекты края.

других точек освещенного края. Из-за хаотичности микрорельефа режущей кромки все эти волны прибывают в точку наблюдения с хаотическими фазовыми сдвигами, что и приводит к хаотической интерференционной картине в ОГП. Эта картина чрезвычайно чувствительна к характеру и числу микронеровностей режущей кромки, размер которых сравним с λ (их число в случае образования картины (б) на рис. 1 больше, чем в случае (а)). Этот вывод подтверждается прямым анализом рельефа кромки лезвия при рассмотрении его с помощью электронного микроскопа, как показано на рис. 2.

Список литературы

- [1] Булдырев В.С., Смирнов В.Н., Строковский Г.А., Фрадкин Э.Е. // Оптика и спектроскопия. 1985. Т. 59. Вып. 6. С. 1255-1261.
- [2] Булдырев В.С., Лялинов М.А., Смирнов В.Н., Строковский Г.А., Фрадкин Э.Е. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. Вып. 3. С. 733-744.
- [3] Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова.

Поступило в Редакцию
18 июня 1993 г.