

УДК 621.317

## О МЕТОДЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ПОРОГОВОЙ ЗАПИСИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. Ф. Ефимков, И. Г. Зубарев, С. И. Михайлов, В. Б. Соболев

*Проведен анализ метода интерференционно-пороговой записи оптической информации, в котором используются пороговые светочувствительные среды. Показано, что основной проблемой применения метода для измерения любых неоднородностей лазерных пучков является отсутствие на интерферограмме координат линий максимума (или минимума) интерференционного множителя. В приближении однородных пучков и для отношения размера неоднородности к периоду интерференции, равным примерно 15, точность измерения малых значений местных минимумов составляет  $\sim 20\%$ . Для больших значений местных минимумов, а также для местных максимумов точность измерения выше. При увеличении отношения размера неоднородности к периоду интерференции более указанного значения точность измерения возрастает.*

В [1, 2] показано, что интерференционно-пороговая запись оптической информации (ИПЗОИ) может быть использована для измерения интенсивности  $I(x, y)$  (или плотности энергии  $e(x, y)$ ) лазерных пучков, где  $x, y$  – поперечные координаты. Метод основан на воздействии интерференционного поля двух пространственноподобных лазерных пучков на светочувствительный материал, обладающий пороговым откликом на интенсивность (плотность энергии) излучения. Одним из первых таких материалов, применявшихся в экспериментах, была обычная копировальная бумага. В настоящее время других пороговых материалов, а также электронных устройств (линеек и матриц с фотоэлементами) с пороговым откликом на излучение либо нет, либо они существуют,

но их не рассматривали с точки зрения применения в ИПЗОИ. Это обусловлено тем, что усилия исследователей и разработчиков всегда были направлены на развитие аналоговых методов. Ситуация может измениться, если будут разработаны или станут известны пороговые материалы и устройства, которые будут обладать более высокими характеристиками, чем аналоговые, либо применение пороговых материалов или устройств по каким-либо причинам окажется предпочтительным.

В [2] был сформулирован основной критерий применимости ИПЗОИ: размер неоднородности лазерного пучка должен быть много больше периода интерференции. Однако для лучшего понимания метода и обоснованного его применения необходимо количественно охарактеризовать этот критерий, а также проиллюстрировать возможности, особенности и трудности использования метода, чему и посвящена настоящая работа.

Исходя из выражения (2) для интерференционного поля в работе [2], предполагая равенство интерферирующих пучков (к чему следует стремиться) и опуская несущественный постоянный множитель, получаем следующее простое выражение для интерференционного поля:

$$J(x, y) = I(x, y) \cos^2(\pi x/d), \quad (1)$$

где  $d$  – период интерференционной картины.

Под действием этого поля на пороговом материале образуются интерференционные полосы (ИП), внутренние точки которых удовлетворяют пороговому условию  $J(x, y) > I_{th}$ , где  $I_{th}$  – пороговая интенсивность материала. Граничные точки интерференционных полос удовлетворяют уравнению

$$I(x, y) \cos^2(\pi x/d) - I_{th} = 0. \quad (2)$$

Будем считать, что взаимодействие интерференционного поля с пороговым материалом описывается выражением (2), т.е. рассмотрим математическую модель метода. Реальная физическая картина может быть более сложной [2]. Пусть исходный лазерный пучок является однородным, т.е. интенсивность в нем постоянна:  $I(x, y) = I_c$ . Из (2) находим координаты краев ИП:  $x = x_i \pm h_c, y$ , где  $x_i = id$  – линия максимума интерференционного множителя (ЛМИМ)  $\cos^2(\pi x/d)$  (т.е.  $\cos^2(\pi x_i/d) = 1$ ),  $i$ -номер полосы,  $h_c = (d/\pi) \arccos \sqrt{I_{th}/I_c}$  – полуширина интерференционной полосы ( $I_{th}/I_c < 1$  ввиду выполнения порогового условия). Решая обратную задачу, определяем  $I_c$  по полуширине интерференционной полосы  $h_c$  экспонированной интерферограммы:

$$I_c = I_{th} [\cos^2(\pi h_c/d)]^{-1}. \quad (3)$$

При этом ЛМИМ находится посредине интерференционной полосы, а  $h_c$  равно половине ширины интерференционной полосы.

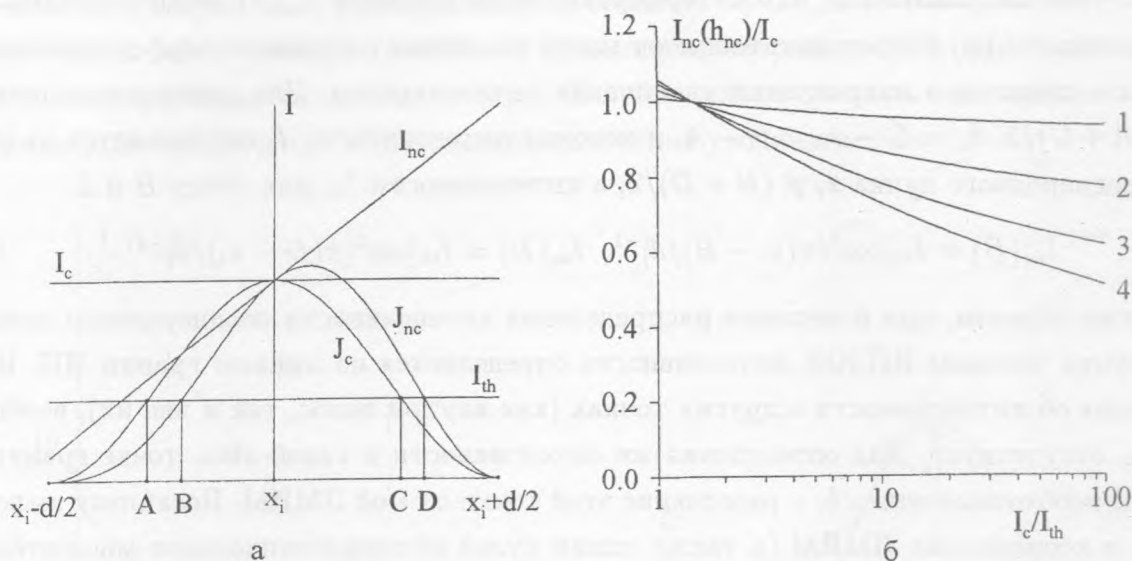


Рис. 1. а – пояснения к методу ИПЗОИ для ситуации, когда интерференционная полоса попадает на прямолинейный склон распределения интенсивности, б – расчетное отношение измеренной интенсивности неоднородного пучка к истинному значению интенсивности, приходящемуся на прямолинейный склон распределения, как функция превышения над порогом при различных наклонах.

Обратимся к неоднородным пучкам. Влияние неоднородностей излучения на образование ИП определяется изменением интенсивности излучения на длине одного периода интерференции. Неоднородные пучки характеризуются наличием максимумов и минимумов и соединяющих их склонов. Пусть ИП попадает на склон (рис. 1а). Сравним образование ИП от однородного излучения с интенсивностью  $I_c$  и неоднородного излучения, описываемого функцией  $I_{nc}(x, y)$ , представляющей собой линейную зависимость по  $x$  (координату  $y$  можно опустить):

$$I_{nc}(x) = I_c [1 + 2(x - x_i)(\beta - 1)/(\beta + 1)d], \tag{4}$$

где  $\beta$  характеризует наклон и показывает, во сколько раз изменяется  $I_{nc}(x)$  на длине периода  $d$ :  $\beta = I_{nc}(x_i + d/2)/I_{nc}(x_i - d/2)$  (для рис. 1а  $\beta = 16$ ). Предполагаем, что ЛМИМ для однородного и неоднородного пучков совпадают и в точке  $x_i$  интенсивности пучков равны:  $I_{nc}(x_i) = I_c$ ;  $J_c(x) = I_c \cos^2(\pi x/d)$ ,  $J_{nc}(x) = I_{nc}(x) \cos^2(\pi x/d)$ .

интерференционные функции для соответствующих пучков. Пересечение  $I_{th}$  с  $J_c$  и  $J_{nc}$  дает граничные точки ИП:  $x = A, C$  для однородного и  $x = B, D$  для неоднородного пучков. Рис. 1а показывает, что интерференционная функция  $J_{nc}(x)$  деформирована по отношению к  $J_c(x)$  и в результате имеют место изменение ширины интерференционной полосы и сдвиг ее в направлении увеличения интенсивности. Для однородного пучка  $x_i = (A + C)/2$ ,  $h_c = C - x_i = x_i - A$ , и искомая интенсивность  $I_c$  определяется из (3). Для неоднородного пучка  $x_i \neq (B + D)/2$ , а интенсивности  $I_{nc}$  для точек  $B$  и  $D$ :

$$I_{nc}(B) = I_{th}[\cos^2(\pi(x_i - B)/d)]^{-1}, \quad I_{nc}(D) = I_{th}[\cos^2(\pi(D - x_i)/d)]^{-1}. \quad (5)$$

Таким образом, при измерении распределения интенсивности неоднородного лазерного пучка методом ИПЗОИ интенсивность определяется по линиям границ ИП. Информация об интенсивности в других точках (как внутри полос, так и вне их), вообще говоря, отсутствует. Для определения же интенсивности в какой-либо точке границы  $i$ -ой ИП необходимо знать  $h_i$  – расстояние этой точки от  $i$ -ой ЛМММ. Поскольку информации о координатах ЛМММ (а также линий нулей интерференционного множителя) на интерферограмме нет, возникает проблема применения ИПЗОИ для пучков с произвольными неоднородностями. Возможности ее решения здесь не обсуждаются.

Поскольку координаты  $x_i$  ЛМММ неизвестны, для оценки измеряемой интенсивности неоднородного лазерного пучка методом ИПЗОИ вводим так называемое приближение однородного пучка. При этом измеряем ширины  $2h_{nc}$  ИП экспонированной интерферограммы и рассчитываем интенсивность согласно выражению (3), т.е. вместо  $I_c$  и  $h_c$  подставляем  $I_{nc}$  и  $h_{nc}$ . Значение координаты рассчитанной интенсивности присваиваем точке, расположенной посередине между краями ИП. На рис. 1б показано отношение  $I_{nc}(h_{nc})/I_c$  в зависимости от  $I_c/I_{th}$  для ситуации, соответствующей рис. 1а. Зависимости 1, 2, 3, 4 соответствуют наклонам  $\beta = 2, 4, 8, 16$ .

Рассмотрим ситуацию с измерением местных минимумов и максимумов неоднородных пучков. Продемонстрируем особенности применения метода ИПЗОИ на примере неоднородного пучка, интенсивность в котором описывается функцией

$$I_{nc} = (I_{max} - I_{min}) \sin^2(\pi x/D) + I_{min}. \quad (6)$$

В таком пучке неоднородность характеризуется размером  $D$  и перепадом  $I_{max} - I_{min}$ . Предполагаем, что ЛМММ совпадает с максимумом или минимумом (6). В приближении однородного пучка расчетные зависимости показаны на рис. 2: зависимости для местного максимума при  $I_{min}/I_{th} = 0$  (при увеличении  $I_{min}/I_{th}$  ошибка измерения максимума уменьшается); зависимости для местного минимума при  $I_{max}/I_{th} = 100$  (при



уменьшении  $I_{max}/I_{th}$  ошибка измерения минимума уменьшается). Как видно, особенно велика ошибка измерения минимума: при  $D/d = 2$ ,  $I_{max}/I_{th} = 100$  и  $I_{min}/I_{th} \simeq 1$  значение, измеренное в приближении однородного пучка, в 13 раз превышает истинное. Чтобы максимальная ошибка не превышала, например, 20%, необходимо, чтобы шаг интерференции примерно в 15 раз был бы меньше размера неоднородности. При дальнейшем увеличении  $D/d$  точность измерения увеличивается.

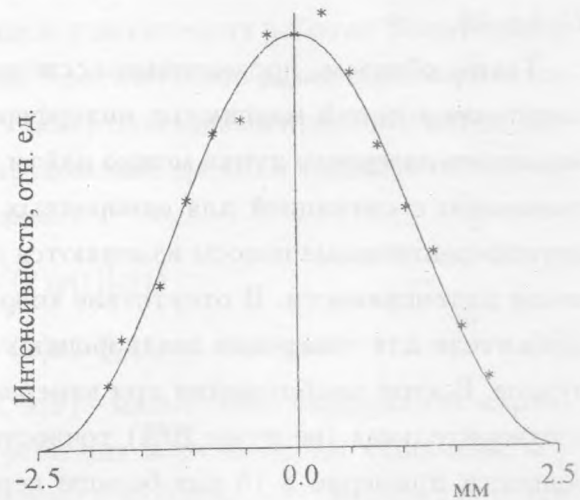
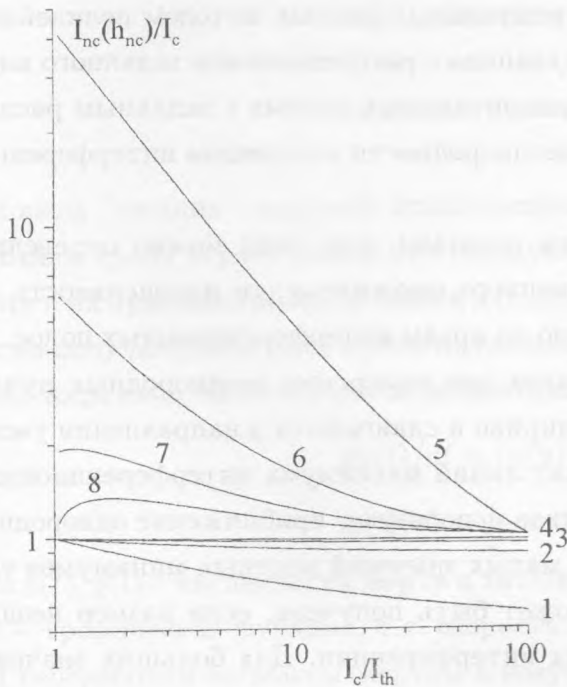


Рис. 2. Расчетная зависимость отношения измеренной интенсивности неоднородного пучка к истинному значению как функция превышения над порогом при различных соотношениях размера неоднородности  $D$  к периоду интерференции  $d$ : при измерении местного максимума для  $D/d = 2, 4, 6, 8$  – кривые 1, 2, 3, 4; при измерении местного минимума  $D/d = 2, 5, 8, 11$  – кривые 5, 6, 7, 8.

Рис. 3. Результаты экспериментального измерения пучка с заданным распределением.

Экспериментально методом ИПЗОИ измерялся лазерный пучок с заданным распределением, которое создавалось следующим образом. Импульсный неодимовый лазер излучал близкий к гауссовому световой пучок с характерным размером  $r_0 = 0.7$  см. Длительность импульса составляла 50 нсек, ширина спектра  $\Delta\nu \leq 10^{-2}$  см $^{-1}$ . С помощью интерферометра Маха–Цандера была получена интерференционная картина с периодом

$D = 0.5$  см, причем центральная полоса проходила почти точно по оси пучка. Таким образом создавалось распределение вида  $\cos^2(\pi x/D) \exp(-x^2/r_0^2)$ , которое и измерялось с помощью стеклянного клина [2]. При этом интерференционные полосы, создаваемые стеклянным клином, были параллельны интерференционным полосам, полученным с помощью интерферометра Маха-Цандера. Период интерференции от измерительного клина составлял  $d = 0.0261$  см. Измерялось осевое сечение пучка в направлении, перпендикулярном полосам. Результаты измерения в приближении однородного пучка приведены на рис. 3. При обработке экспериментальных данных методом нелинейного сглаживания была получена кривая, которая совпала с распределением заданного вида. Видно удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с заданным распределением при соотношении между размером неоднородности и периодом интерференции  $D/d \simeq 19$ .

Таким образом, проведенные исследования показали, что, если можно определить координаты линий максимума интерференционного множителя, то интенсивность измеряемого лазерного пучка можно найти точно по краям интерференционных полос. По сравнению с ситуацией для однородных пучков при измерении неоднородных пучков интерференционные полосы изменяются по ширине и сдвигаются в направлении увеличения интенсивности. В отсутствие координат линий максимума интерференционного множителя для измерения неоднородных пучков используют приближение однородных пучков. В этом приближении при измерении малых значений местных минимумов удовлетворительная (не хуже 20%) точность может быть получена, если размер неоднородности примерно в 15 раз больше периода интерференции. Для больших значений местных минимумов, а также для местных максимумов точность измерения выше. При увеличении отношения размера неоднородности к периоду интерференции свыше указанного значения, точность измерения возрастает.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ефимков В. Ф., Зубарев И. Г., Колобродов В. В., Соболев В. Б. Авторское свидетельство N 1480516, приоритет от 14.09.1987 г.
- [2] Ефимков В. Ф., Зубарев И. Г., Колобродов В. В., Соболев В. Б. Квантовая электроника, **16**, N 8, 1731 (1989).

Поступила в редакцию 28 октября 1999 г.