

САМОРЕМОНТ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТРАНСПАРАНТА В ПЛОСКОСТЯХ ТАЛЬБОТА

Малов А.Н., Феценко В.С.

Иркутский государственный технический университет
Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко

Аннотация

В работе экспериментально рассмотрен эффект самореставрации изображения периодического объекта в плоскостях Тальбота. Путем сравнительного исследования параметров изображения в параксиальной области и в боковых лепестках дифракции показано, что изображение в боковых лепестках более устойчиво к повреждениям исходного транспаранта. На основании этих исследований, проанализированы механизмы, влияющие на ухудшение качества изображения в параксиальной области и в боковых лепестках.

Введение

Использование когерентно-оптических методов и систем для обработки, представления и хранения информации обеспечивает прогресс в современных информационных технологиях. В связи с этим, уже длительное время, большой интерес вызывает изучение пространственно-периодических электромагнитных полей, возникающих при дифракции света на периодических транспарантах, которые используются в лазерных технологических установках [1], системах промышленной и бесконтактной диагностики и метрологии [2, 3], при обработке оптической информации и построения изображений [2, 4, 5].

Особое внимание при этом уделяется количественному и качественному изучению эффекта Тальбота [2]. Это связано с таким интересным свойством изображений построенных с помощью этого эффекта, как самореставрация [6, 7]. К настоящему времени проведено множество исследований как эффекта Тальбота, так и связанного с ним эффекта самореставрации. Но если для эффекта Тальбота разработана глубокая теория, например [8-11], то исследования эффекта самореставрации носили в основном прикладной и преимущественно качественный характер [12]. Кроме того, незаслуженно была обойдена вниманием непараксиальная область при дифракции Френеля. Так, если для пространственных частот разделенных при дифракции Фраунгофера в когерентной оптике закрепился термин «порядок дифракции», то для изображений, получаемых в этой области при дифракции Френеля, даже нет своего особого термина. В данной статье мы использовали для их обозначения и разграничения с изображениями, полученными в классическом эффекте Тальбота, термин, взятый из радиофизики – «боковой лепесток», по аналогии с боковым лепестком диаграммы направленности антенны.

Ранее [13-15] нами были качественно рассмотрены свойства изображений периодического объекта при внеосевом эффекте Тальбота. В [13] было показано, что можно, используя пространственные частоты f_x и f_y от двух разных транспарантов с одинаковым рисунком, синтезировать полноценные изображения во внеосевой области, т.е. в боковых лепестках. Было замечено, что качество этих изображений было выше, чем в классическом эффекте Тальбота. Кроме того, было сделано предположение, что эти изображения должны быть более ус-

тойчивы к повреждениям первоначального транспаранта, т.к. пространственный спектр повреждений обычно уже пространственного спектра элементарных изображений.

В этой работе мы количественно и качественно исследуем свойства изображений в плоскостях Тальбота путем сравнения их свойств в параксиальной области и в боковых лепестках.

Методика эксперимента

Для подтверждения заключений сделанных в [13] были проделаны эксперименты по изучению влияния повреждения периодического транспаранта на качество изображений в приосевых плоскостях Тальбота и в боковом лепестке.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве источника когерентного излучения мы использовали HeNe лазер ЛГН-222, мощностью до 30 мвт (1). Излучаемый им пучок лазерного света расширялся длиннофокусной линзой (2) и попадал на периодический транспарант (3) (диаметр светового пятна на транспаранте достигал 20 мм), где происходила дифракция света. Затем, распространяясь в свободном пространстве, свет попадал на экран (4) расположенный в одной из плоскостей Тальбота. Изображения в плоскости Тальбота фиксировались с помощью электронного фотоаппарата (7) и вводились в компьютер (8), где затем обрабатывались и анализировались с помощью графических программ.

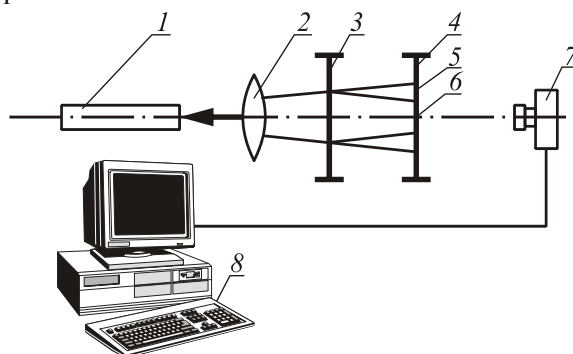


Рис. 1. Схема эксперимента.
1 – лазер; 2 – линза; 3 – периодический транспарант;
4 – экран;
5 – изображения построенные в боковом лепестке;
6 – изображение построенные в параксиальной области; 7
– электронный фотоаппарат; 8 – компьютер

Нами производилось пять снимков изображений с одной точки при одной экспозиции и после этого каждое изображение вводилось в компьютер и обрабатывалось отдельно. Затем результат усреднялся.

Фазовые транспаранты размером 35x25 мм изготовлялись по методике дубящего отбеливания [16]. Они были абсолютно прозрачными, с коэффициентом мультипликации равным 7. Период транспарантов составлял $d=0,6 \text{ мм}^{-1}$.

Повреждения наносились в виде квадрата в центральной области транспаранта с помощью абсолютно непрозрачных черных чернил под микроскопом. Всегда закрашивалось целое число изображений. Количество закрашенных изображений соотносилось со всеми освещенными лазерным пучком изображениями и выражалось в процентах.

В качестве обобщенного критерия качества изображений нами был принят средний контраст изображения выраженный по следующей формуле:

$$K_a = \left[\sum_{n=0}^N (I_{\max} - I_{\min})_n \right] / N \quad (1)$$

где $(I_{\max} - I_{\min})$ – разность между интенсивностью соседних максимумов и минимумов, N – количество измерений.

Нами также фиксировалась средняя интенсивность изображения.

$$I_a = \sum_0^N I_n / N \quad (2)$$

где I_n – интенсивность излучения в каждой точке изображения, N – количество измеренных точек.

В связи с тем, что общая интенсивность изображения в боковых лепестках ниже, чем в параксиальной области мы производили нормировку среднего контраста и средней плотности относительно этих же параметров изображения без повреждений. Что можно выразить в виде соотношений:

$$K_{norm} = \left(\left[\sum_{n=0}^N (I_{\max} - I_{\min})_n \right]_{повр} / \left[\sum_{n=0}^N (I_{\max} - I_{\min})_n \right]_{неповр} \right) \times 100\% \quad (3)$$

и

$$I_{norm} = \left(\left[\sum_0^N I_n \right]_{повр} / \left[\sum_0^N I_n \right]_{неповр} \right) \times 100\% \quad (4)$$

Этот пересчет производился для корректного сравнения изменения качества изображений в параксиальных областях и в боковых лепестках.

Результаты экспериментов и обсуждение

Результаты эксперимента представлены на рис. 2 в виде графиков.

Из рис. 2а видно, что средний контраст изображения в параксиальной области (1) ведет себя, как и

следовало ожидать, т.е. он монотонно уменьшается с увеличением количества повреждений. Это связано как с уменьшением общей интенсивности изображения в центральной области (рис. 2б), так и с повышением общего уровня шумов, вносимых нарушением регулярной структуры изображения и дифракцией света на краях дефекта.

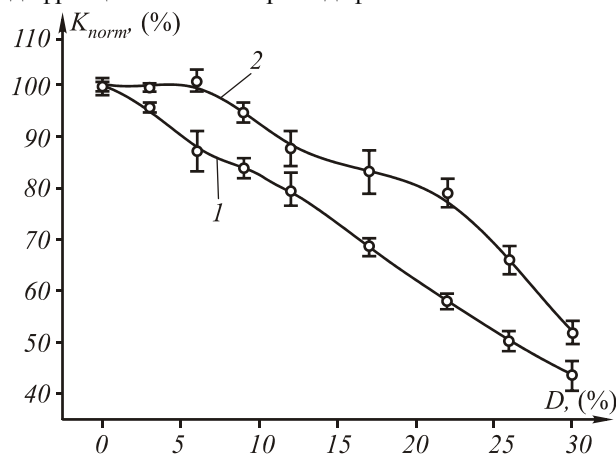


Рис. 2а. Зависимость нормированного контраста изображения от процента повреждения исходного изображения: 1 – в параксиальной области, 2 – в непараксиальной области

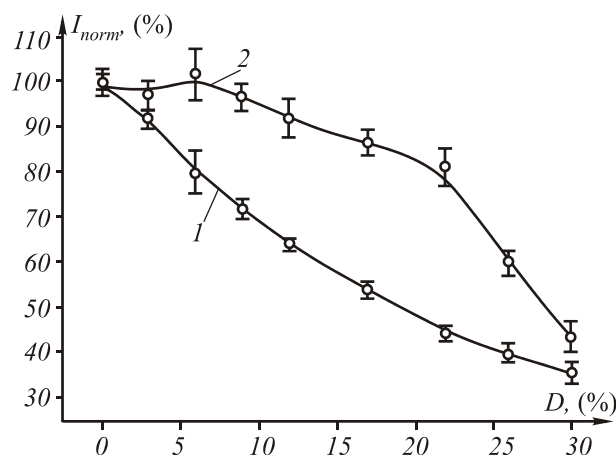


Рис. 2б. Зависимость нормированной интенсивности изображения от процента повреждения исходного изображения: 1 – в параксиальной области, 2 – в непараксиальной области

В непараксиальном регионе наблюдается несколько иная картина. Сначала (вплоть до 6% повреждений) нормированный контраст не изменяется. А затем он начинает монотонно уменьшаться с той же скоростью, что и контраст в параксиальной области, графики практически параллельны друг другу. Общая интенсивность изображения в непараксиальной области тоже имеет плато до 6% повреждений. Затем падение ее значений происходит медленнее, чем интенсивности в параксиальной области. И только после 20% происходит резкое падение общей интенсивности в боковом лепестке.

Такое разное поведение характеристик изображений в параксиальном регионе и в боковых лепестках говорит о том, что механизмы ухудшения изображения при разной степени повреждения несколько отличаются.

На первом этапе, когда дефект занимает до 6% площади транспаранта, основной вклад в ухудшение контраста изображения вносит дифракция излучения на краях дефекта. Нарушения регулярности структуры в этот момент практически незаметны. В параксиальной зоне наблюдается эффект саморемонта изображения [6, 7], при некотором снижении общей интенсивности. В боковых лепестках, интенсивность изображения в которых зависит исключительно от количества периодов регулярного транспаранта, на котором дифрагирует свет [17], в этот момент времени ничего не происходит. И общая интенсивность и общий контраст остаются без изменений, так как пространственный спектр дефекта никак не влияет на изображения в боковых лепестках дифракции.

При дальнейшем нарастании площади дефекта от 6% до 20% существенный вклад в ухудшение изображения начинает вносить уменьшение общей энергии излучения, преобразуемой в изображение за счет поглощения света на дефекте. Общий контраст и в параксиальной области, и в области боковых лепестков ухудшается, в основном, за счет уменьшения максимумов интенсивности и, соответственно, разности между максимумами и минимумами. В то же время начинает проявляться и нарушение регулярности структуры транспаранта. В это время в параксиальной области изображение вокруг дефекта и внутри него начинает искажаться и резко падает его интенсивность. В непараксиальной области при этом наблюдается более медленное падение общей интенсивности, что говорит о незначительном вкладе уменьшения периодов регулярного объекта в уменьшение интенсивности единичного изображения. Кроме того, изображение в непараксиальной области почти не искажается, что также подтверждает первоначальный тезис.

И, наконец, при размере дефекта более 20% начинает сказываться уменьшение количества периодов регулярного транспаранта, вносящих вклад в изображение. Это проявляется в резком падении интенсивности изображений в боковом лепестке, при монотонном уменьшении общего контраста. В параксиальной области в это время наблюдаются полное отсутствие изображений в центре дефекта и сильное искажение изображений вокруг него.

Заключение

Гипотеза о том, что изображения в боковых лепестках являются более устойчивыми к дефектам исходного транспаранта, подтвердилась. Это дей-

ствительно происходит за счет более узкого пространственного спектра дефектов по сравнению с пространственным спектром единичных изображений. Это обстоятельство позволяет рекомендовать использовать для обработки и построения изображений боковые дифракционные лепестки.

Литература

1. Bourdet Gilbert L., Lescroart G. Phase-coupled CO₂ laser array performance and lossless beam shaping // Proc. SPIE, 1998. V. 3549. P. 57-67.
2. Patorski K. The self-imaging phenomenon and its application. / Progress in optics, 1989. V. XXVII. P. 3-108.
3. Аристов В.В., Ерко А.И. Мартынов И.М. Оптика и спектроскопия на основе эффекта Тальбота // Опт. и спектр. 1988. Т. 64. № 3. С. 630-637.
4. Денисюк Ю.Н., Рамишвили М.М., Чавчанидзе В.В. О возможности получения пространственных изображений двумерных объектов без помощи линз и голографии // Опт. и спектр. 1971. Т. 30. С. 1130-1134.
5. Chavel N., Strand T.S. Range measurement using Talbot diffraction imaging of gratings // Appl. Opt., 1984. V. 23, № 6. P. 862-871.
6. Damman H., Groh G. and Kock M. Restoration of faulty images of periodic objects by means of self-imaging // Appl. Opt., 1971. V. 10. P. 1454-1455.
7. Kalestynski A. and Smolinska B. Self-restoration of the autoidolon of defective periodic objects // Optica Acta, 1978. V. 9. P. 125-134.
8. Lord Rayleigh On copying diffraction-gratings, and on some phenomenon connected therewith // Philos.Mag., 1881. V. 11. P. 196-205.
9. Cowley J.M. and Moodie A.F., Fourier images // Proc.R.Soc.London Ser., 1957. B. 70. P. 486-496.
10. Jahns J., Lohmann A.V., Ojeda-Castaneda J. Self-imaging effect-A new approach // Opt. Acta, 1984. V. 31. № 3. P. 313-324.
11. Cheng Yih-Shyang and Chang Ray-Chung Theory of image formation using the Talbot effect // Appl. Opt., 1994. № 10. P. 1863-1874.
12. Lohmann A.W., Thomas J.A. Making an array illuminator based on the Talbot effect // Appl. Opt., 1990. V. 29. № 29. P. 4337-4340.
13. Корфуненко О.А., Малов А.Н., Фещенко В.С. Мультипликация изображений с помощью внеосевого эффекта Тальбота // Компьютерная оптика, ИСОИ РАН. Самара-Москва, 1999. Вып. 19. С. 71-73.
14. Feshchenko V.S., Malov A.N., Rogozhnikova O.A., Vigovsky Y.N., Feshchenko L.V. Lensless optical image processing of periodical object // Proc. SPIE, 2001. V. 4513. P. 136-143.
15. Feshchenko V.S., Malov A.N., Rogodjnikova O.A., Vigovsky Y.N. Nonparaxial Talbot effect // Proc. SPIE, 2003. V. 5134. P. 108-119.
16. Vigovsky Y.N., Konop A.G., Konop S.P., Malov A.N., Malov S.N., Feshchenko V.S. New dichromatid gelatine technologies for the diffraction optical elements fabrication // Proc. SPIE, 1998. V. 3347. P. 314-324.
17. Борн М., Вольф Э. Основы оптики // М.: Наука, 1970. - 855 с.

A periodic object image self-restoration in Talbot's planes

A.N. Malov¹, V.S. Feshchenko²

¹ Irkutsk National Research Technical University

² Taras Shevchenko Transnistria State University

Abstract

The effect of the periodic object image self-restoration in Talbot's planes was studied experimentally. A comparative investigation of the image parameters in paraxial area and in side lobes of diffraction was performed. It was proved that the images in side lobes are more resistant to damage to the initial object. On the basis of these studies, mechanisms were analyzed that influence deterioration of images in paraxial area and in side lobes.

Keywords: image self-restoration, Talbot plane, paraxial area, side lobe.

Citation: Malov AN, Feshchenko VS. A periodic object image self-restoration in Talbot's planes. *Computer Optics* 2004; 26: 53-55.

References

- [1] Bourdet GL, Lescroart G. Phase-coupled CO₂ laser array performance and lossless beam shaping. *Proc SPIE* 1998; 3549: 57-67.
- [2] Patorski K. The self-imaging phenomenon and its application. *Progress in Optics* 1989; XXVII: 3-108.
- [3] Aristov VV, Erko AI, Martynov VV. Optics and spectrometry based on the Talbot effect [In Russian]. *Optika i Spektroskopiya* 1988; 64(3): 630-637.
- [4] Denisyuk YN, Ramishvili MM, Chavchanidze VV. Production of three-dimensional images of two-dimensional objects without lenses or holography. *Optika i Spektroskopiya* 1971; 30: 1130-1134.
- [5] Chavel N, Strand TS. Range measurement using Talbot diffraction imaging of gratings. *Appl Opt* 1984; 23(6): 862-871.
- [6] Damman H, Groh G, Kock M. Restoration of faulty images of periodic objects by means of self-imaging. *Appl Opt* 1971; 10: 1454-1455.
- [7] Kalestyński A, Smolińska B. Self-restoration of the autoidolon. *Optica Acta*, 1978; 25(2): 125-134.
- [8] Lord Rayleigh FRS. On copying diffraction-gratings, and on some phenomenon connected therewith. *Philos Mag* 1881; 67(11): 196-205.
- [9] Cowley JM, Moodie AF. Fourier images. *Proc Math Phys Eng Sci* 1957; 70: 486-496.
- [10] Jahns J, Lohmann AW, Ojeda-Castaneda J. Talbot and Lau effects, a parageometrical approach. *Optica Acta* 1984; 31(3): 313-324.
- [11] Cheng Y-S, Chang R-C. Theory of image formation using the Talbot effect. *Appl Opt* 1994; 33(10): 1863-1874.
- [12] Lohmann AW, Thomas JA. Making an array illuminator based on the Talbot effect. *Appl Opt* 1990; 29(29): 4337-4340.
- [13] Korfunenko OA, Malov AN, Feshchenko VS. Animation of images using off-axis Talbot effect [In Russian]. *Computer Optics* 1999; 19: 71-73.
- [14] Feshchenko VS, Malov AN, Rogozhnikova OA, Vigovsky YN, Feshchenko LV. Lensless optical image processing of periodical object. *Proc SPIE* 2001; 4513: 136-143.
- [15] Feshchenko VS, Malov AN, Rogodjnikova OA, Vigovsky YN. Nonparaxial Talbot effect. *Proc SPIE* 2003; 5134: 108-119.
- [16] Vigovsky YN, Konop AG, Konop SP, Malov AN, Malov SN, Feshchenko VS. New dichromatidgelatine technologies for the diffraction optical elements fabrication. *Proc SPIE* 1998; 3347: 314-324.
- [17] Born M, Wolf E. *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2000.