Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 6, с. 368 – 370

Наблюдение высоких порядков дробного эффекта Тальбота в оптическом диапазоне

А. Н. Морозов, Л. Р. Салбиева, Б. Г. Скуйбин, Е. В. Смирнов[1)]

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 февраля 2018 г.

Выполнено экспериментальное исследование эффекта Тальбота при дифракции света на амплитудной дифракционной решетке. Обнаружен и исследован дробный эффект Тальбота высоких порядков вплоть до $d/102$, где d – период решетки. Отмечаются возможности практического использования этого явления.

DOI: 10.7868/S0370274X1806005X

Явление самоизображения периодической системы когерентных источников излучения в ближнепольной дифракции – эффект Тальбота – в последнее время является объектом пристального внимания исследователей (см. [1–3] и приведенные там ссылки). Связано это как с глубоким физическим содержанием самого явления, так и с очень широкой областью его применения, охватывающей практически все волновые процессы – оптику, акустику, рентгеновские лучи, волны в волноводах и т.д.

К настоящему моменту наиболее детальные исследования эффекта Тальбота выполнены для случая электромагнитных волн [4–9] и волн материи де Бройля микрочастиц, в том числе электронов [10, 11], атомов гелия [12, 13] и крупных молекул [14, 15].

Важной особенностью ближнепольной дифракции является возможность получения изображения решетки не только с ее периодом d, но и с дробным периодом d/m, где m – целое число, так называемый дробный эффект Тальбота. Возможность наблюдения дробных изображений была отмечена еще Релеем [16], однако до сих пор экспериментальное исследование таких изображений было выполнено лишь для небольших значений $m < 8$ [12, 17, 18].

В настоящей работе изучен дробный эффект Тальбота высоких порядков (вплоть до значений $m = 102$) в оптическом диапазоне и отмечаются возможности его практического применения.

Для исследования высоких порядков дробного эффекта Тальбота была создана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Излучение *1* от лазера проходит через телескоп, состоящий из двух софокусных линз *2–3*. Короткофокусная линза *2* имеет фокусное расстояние $f_1 = 5$ мм,

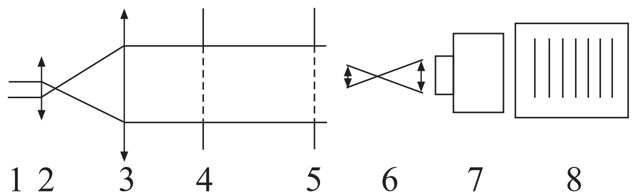

Рис. 1. Экспериментальная схема наблюдения эффекта Тальбота

а длиннофокусная линза *3* – $f_2 = 200$ мм. Использование телескопа позволяет равномерно освещать дифракционную решетку *4*.

Дифрагировавшее на решетке излучение *5* попадает через микроскоп *6* на светочувствительную матрицу фотокамеры Moticam1SP *7* с физическим размером 8×8 мм и количеством активных пикселей 14 Мпикс. Микрометрический винт юстировочного устройства, на котором расположены микроскоп и камера, позволяет перемещать его с точностью до 10 мкм в пределах 40 мм, что дает возможность детального изучения структуры дробных изображений Тальбота. С фотокамеры изображение передается на монитор *8* компьютера.

Длина волны излучения используемого в эксперименте лазера $\lambda = 0.53$ мкм, период одномерной дифракционной решетки составляет $d = 0.18$ мм. В этом случае длина Тальбота $L_{\mathrm{T}} = 2d^2/\lambda$, на которой происходит самоизображение дифракционной решетки, имеет значение $L_{\mathrm{T}} = 122.3$ мм.

На рис. 2 приведены наблюдаемые в эксперименте тальботовские изображения дифракционной решетки с периодом d. Рис. 2а представляет изображение решетки, полученное на расстоянии z за решеткой, равном длине Тальбота L_{T}, т.е. изображение исходной решетки. Результаты представлены в масштабе, равном одному периоду решетки на полный размер

[1)]e-mail: seva09@rambler.ru

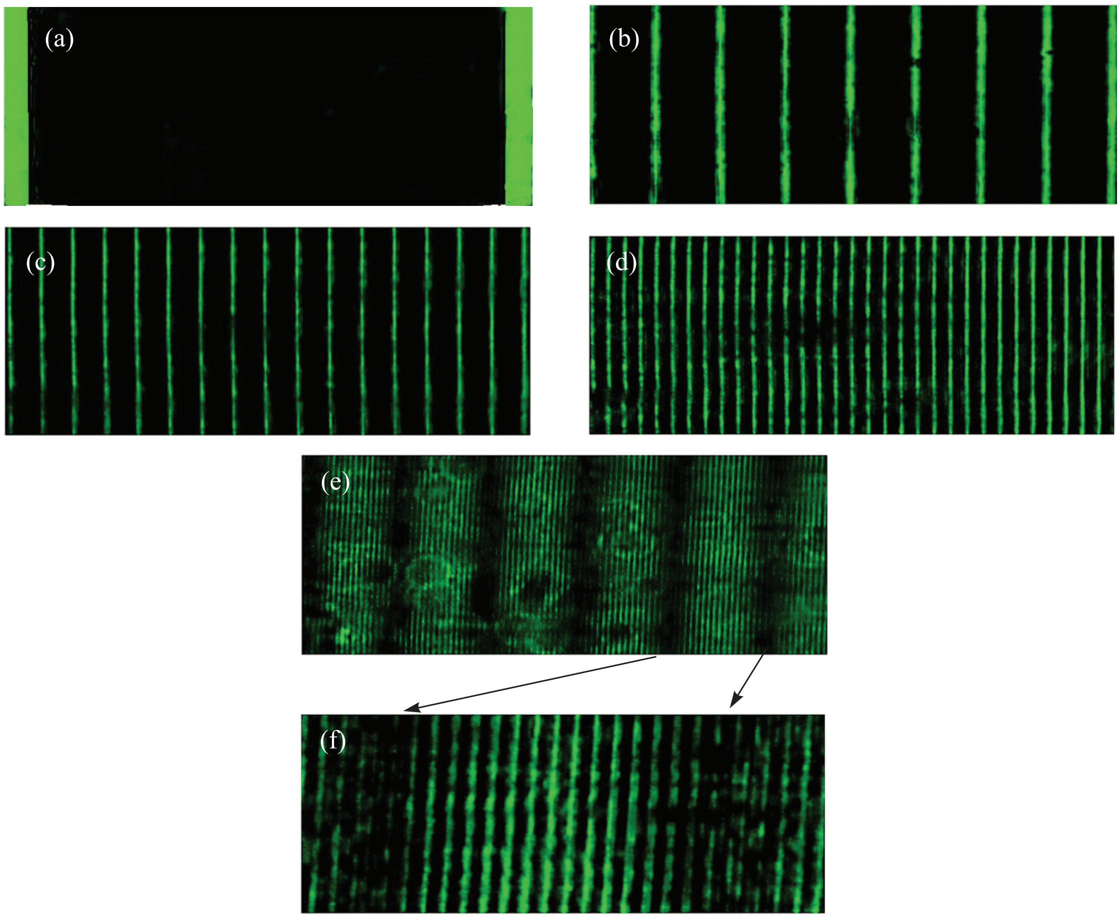

Рис. 2. Эффект Тальбота для целочисленного и дробных изображений одномерной дифракционной решетки

кадра, так, чтобы в поле изображения могло поместиться дробное изображение решетки с максимально возможным для наблюдения значением m, т.е. с минимальным периодом d/m.

На рис. 2b показано дробное тальботовское изображение решетки с периодом $d/8$, при котором на основном периоде d укладывается 8 периодов дробного изображения решетки. На рис. 2c приведено дробное изображение с периодом $d/16$. И для $m = 8$ и для $m = 16$ наблюдается отчетливые дробные изображения решетки, что свидетельствует о хорошем качестве используемой в эксперименте оптической схемы. Следует отметить, что для этих двух случаев ширина щелей изображаемых решеток для дробного эффекта Тальбота убывает с ростом m и оказывается значительно меньше ширины изображения щелей самой решетки, используемой в эксперименте (рис. 2a). Такая особенность дифракционной картины в ближней зоне отмечается впервые.

Представленное на рис. 2d дробное тальботовское изображение дифракционной решетки имеет период $d/32$, а на рис. 2e – период $d/102$. На рис. 2e видно наложение изображений с периодом $d/102$ и $d/6$. Для более четкой иллюстрации дифракционной картины изображение одного из периодов $d/6$ развернуто на рис. 2f (указано стрелками). В одном периоде изображения с $d/6$ укладывается 17 периодов изображения решетки с периодом $d/102$. Естественно, что при столь больших значениях m изображения решетки оказываются менее отчетливыми.

Отметим, что приведенные на рис. 2 изображения не только наглядно представляют высокие порядки дробного эффекта Тальбота, но и оказываются в значительной степени свободными от аберрации, которая наблюдалась в работах [19, 20].

Полученные в данной работе результаты дают возможность надеяться на то, что совершенствование экспериментальных условий позволит получать отчетливые дробные тальботовские изображения дифракционной решетки не только для максимального исследованного в данном эксперименте значения $m = 102$, но и для еще бо́льших значений m.

Результаты данной работы могут быть использованы практически во всех тех областях, в которых в настоящее время перспективно применение эффекта Тальбота – в молекулярной метрологии, контроле волновых фронтов лазеров, изучении турбулентных потоков газов и жидкостей, криптографии, исследовании схем фоторезисторов с переменной проводимостью и др.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.С. Горелика и Л.А. Чернозатонского за полезные обсуждения.

---

1. J. Wen, Y. Zhang, and M. Xiao, Advances in Optics and Photonics **5**, 83 (2013).
2. А. Н. Морозов, М. П. Крикунова, Б. Г. Скуйбин, Е. В. Смирнов, Письма в ЖЭТФ **106**, 15 (2017).
3. K. Patorski, Progress in Optics **27**, 1 (1989).
4. J. Cowley and A. Moodie, Proc. Phys. Soc. B **70**, 486 (1957).
5. J. Cowley and A. Moodie, Proc. Phys. Soc. B **70**, 497 (1957).
6. J. Cowley and A. Moodie, Proc. Phys. Soc. B **70**, 505 (1957).
7. J. T. Winthrop and C. R. Worthington, J. Opt. Soc. Am. **55**, 373 (1965).
8. W. D. Montgomery, J. Opt. Soc. Am. **57**, 772 (1967).
9. M. V. Berry and S. Klein, J. Mod. Opt. **43**, 2139 (1996).
10. A. D. Cronin and B. McMorran, Phys. Rev. A **74**, 061602 (2006).
11. B. McMorran and A. D. Cronin, New J. Phys. **11**, 033021 (2009).
12. S. Nowak, Ch. Kurtsiefer, T. Pfau, and C. David, Opt. Lett. **22**, 1430 (1997).
13. A. D. Cronin, J. Schmiedmayer, and D. E. Pritchard, Rev. Mod. Phys. **81**, 1051 (2009).
14. S. Gerlich, L. Hackermuller, K. Hornberger, A. Stibor, H. Ulbricht, M. Gring, F. Goldfarb, T. Savas, M. Müri, M. Mayor, and M. Arndt, Nature Phys. **3**, 711 (2007).
15. K. Hornberger, S. Gerlich, Ph. Haslinger, S. Nimmrichter, and M. Arndt, Rev. Mod. Phys. **84**, 157 (2012).
16. J. S. Rayleigh, Philos. Mag. **11**, 196 (1881).
17. B. Besold and N. Lindlein, Pure Appl. Opt. **6**, 691 (1997).
18. W. B. Case, M. Tomandl, S. Deachapunya, and M. Arndt, Opt. Exp. **17**, 20966 (2009).
19. S. Chang and S. I. Lee, Optik **119**, 742 (2008).
20. S. Chang and S. I. Lee, Optik **121**, 230 (2010).