

Некоторые особенности формирования фотолитографических изображений в частично когерентном излучении

М.А.Кицак, А.И.Кицак

Приведены результаты экспериментального исследования уровня когерентных шумов в проекционных изображениях резкого края непрозрачного экрана, формируемых в модельной схеме фотолитографической установки при различной степени пространственной когерентности освещающего экран излучения. Уменьшение пространственной когерентности лазерного излучения осуществлялось с помощью разработанного устройства, входившего в состав макета установки в качестве отдельного функционального элемента. Достигнута высокая эффективность сглаживания в полученных изображениях пространственных флуктуаций интенсивности излучения, обусловленных случайной пространственной неоднородностью интенсивности исходного лазерного пучка.

Ключевые слова: когерентные шумы, пространственная когерентность, фотолитографическая установка.

1. Введение

Как известно, реализация предельного разрешения в проекционных схемах формирования изображений, например в проекционной литографии, требует оптимизации (при заданной длине волны излучения подсветки объекта и числовой апертуре объектива) большого числа оптических параметров компонентов изображающей системы, в том числе характеристик освещающего объект излучения [1–5]. В частности, осуществляется гомогенизация пространственного распределения интенсивности светового поля в плоскости объекта и оптимизация степени его пространственной когерентности. Данные операции проводятся с целью достижения однородности освещенности элементов изображения и их высокого контраста в плоскости регистрации. Необходимость проведения операции выравнивания освещенности связана с тем, что в проекционных литографических установках настоящего времени (повторителях и сканерах) используются и, очевидно, будут использоваться в ближайшем будущем (в иммерсионной литографии) [6–8] лазерные источники излучения, генерирующие пучки с узким спектром временных частот и, как правило, неоднородным по пространству (гауссовым) распределением интенсивности. Часто данные пучки имеют вдобавок пространственные флуктуации интенсивности, обусловленные пространственной неоднородностью коэффициента отражения зеркал резонаторов лазеров [9]. Неоднородность освещенности в плоскости изображения может быть обусловлена, кроме того, появлением так называемого спекл-шума [10] в результа-

те рассеяния излучения на случайных амплитудно-фазовых неоднородностях оптических элементов литографической установки и воздушных или заполненных иммерсионной жидкостью промежутков между компонентами установки. Уровень данных шумов определяется степенью пространственной когерентности излучения, используемого для получения изображения. Неоднородность освещенности элементов изображения приводит к неоднородности засветки регистрирующего материала и к появлению дефектов в проявленном изображении. Допустимое отклонение распределения освещенности в плоскости изображений с субмикронным и нанометровым разрешением от однородного составляет $\sim 2\%$ [11].

Для преобразования пространственной структуры лазерных пучков и варьирования их пространственной когерентности в литографических установках применяются специальные устройства, которые располагаются между источником излучения и конденсором [11]. Основными требованиями, предъявляемыми к работе данных приборов, являются быстроедействие и минимальное изменение временной когерентности излучения. В настоящее время существует большое число конструкций преобразователей когерентных и пространственных характеристик излучения, многие из которых применяются в современных литографах [12–13].

Эффективное преобразование степени пространственной когерентности излучения за короткие времена можно осуществлять с использованием устройств типа линий задержки [14–16]. Уменьшение пространственной когерентности в них осуществляется созданием совокупности независимых источников излучения (пространственно-когерентных мод) путем деления исходного пучка лазера на парциальные составляющие, сдвинутые относительно друг друга во времени на промежутки, равные или большие интервала когерентности. Достоинством данного способа преобразования когерентности излучения является отсутствие сдвига временной частоты, который характерен для схем преобразования, основанных на модуляции во времени пространственной фазы излучения. Среди схем преобразования когерентности, перспективных для при-

М.А.Кицак. Cooperative Association for Internet Data Analysis, University of California, San Diego, 9500 Gilman dr, La Jolla, CA, 92093, USA; e-mail: maxkitsak@yahoo.com

А.И.Кицак. Белорусский государственный университет, кафедра лазерной физики и спектроскопии, просп. Независимости, 4, Белоруссия, 220030 Минск; e-mail: kitsak48@mail.ru

Поступила в редакцию 9 октября 2009 г., после доработки – 9 сентября 2010 г.

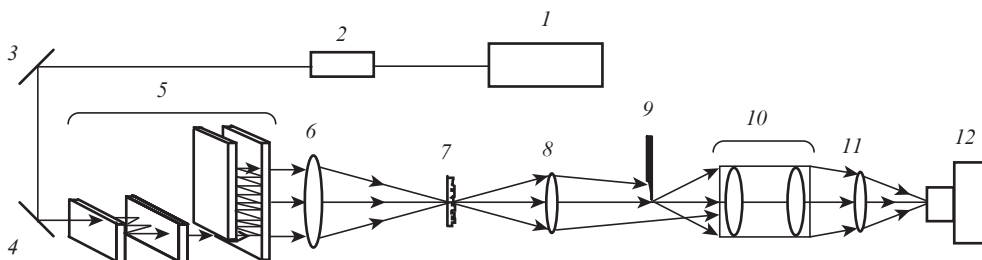


Рис.1. Оптическая схема установки для записи изображений частично когерентным излучением:
 1 – источник когерентного излучения (импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер; 2 – преобразователь частоты излучения в четвертую гармонику ($\lambda = 266$ нм); 3, 4 – система поворотных зеркал; 5 – линия задержки; 6 – линза для формирования вторичного источника излучения; 7 – случайно-неоднородная фазовая пластинка; 8 – конденсорная линза; 9 – тест-объект; 10 – проекционный объектив; 11 – линза; 12 – линейная CCD-камера.

менения в проекционной литографии EUV диапазона длин волн, можно выделить предложенную ранее в работах [17, 18] линию задержки. Достоинством ее является минимальная потеря энергии излучения на поглощение в связи с формированием пространственно-когерентных мод системой зеркал, а также возможность синтеза вторичных источников различной формы, например в виде дуги, квадрупольа и других структур, используемых для улучшения пространственного разрешения.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эффективности сглаживания когерентных шумов (спекл-шумов) в проекционных изображениях, формируемых в модельной схеме фотолитографической установки при изменении пространственной когерентности излучения устройством, входящим в ее состав в виде отдельного элемента.

2. Оптическая схема макета фотолитографической установки

В работе исследовалась эффективность подавления шумов в изображениях тест-объекта, регистрируемых с применением в схеме регистрации устройства декогерентизации излучения. Для этого была собрана экспериментальная установка, оптическая схема которой представлена на рис.1.

Приведем оптические характеристики излучения и основных структурных компонентов оптической схемы. Энергия импульса излучения на длине волны $\lambda = 266$ нм составляла ~ 25 мДж. Модуль степени временной когерентности данного излучения представлен на рис.2.

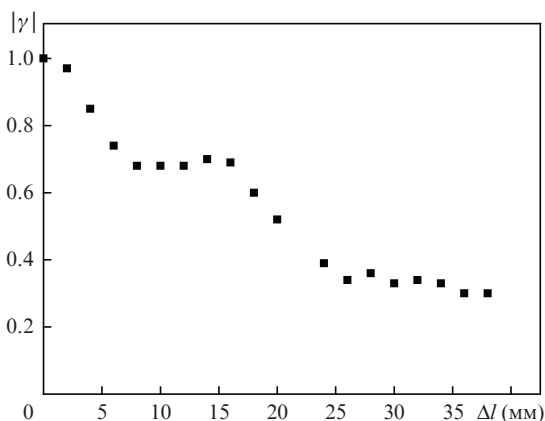


Рис.2. Зависимость модуля степени временной когерентности излучения $|\gamma|$ от разности хода световых пучков Δl .

Линия задержки 5 состоит из двух групп зеркал для деления исходного лазерного пучка на совокупность парциальных пучков примерно равной интенсивности. Расстояние между зеркалами устанавливается таким, чтобы обеспечить сдвиг во времени импульсов излучения в пучках относительно друг друга на величину, равную или большую времени когерентности исходного излучения. Для выравнивания интенсивности пучков использовались зеркала с переменным коэффициентом отражения на заданной длине волны. Число формируемых на выходе линии задержки и определяющих степень пространственной когерентности излучения эффективных пространственно-когерентных мод [17]

$$P_{\text{eff}} = P_{\text{eff}}^{(0)} \frac{\left(\sum_{n=0}^{p-1} I_n \right)^2}{\sum_{n=0}^{p-1} I_n^2} + 2 \sum_{n=0}^{p-1} \sum_{n'=n+1}^{p-1} I_n I_{n'} |\gamma(\tau_n - \tau_{n'})|^2, \quad (1)$$

где $P_{\text{eff}}^{(0)}$ – эффективное число пространственно-когерентных мод излучения на входе в линию задержки; I_n – интенсивность излучения в отдельном пучке; $|\gamma(\tau_n - \tau_{n'})|$ – значение модуля степени временной когерентности между пучками с номерами n и n' , импульсы излучения в которых сдвинуты относительно друг друга на время $\tau_n - \tau_{n'}$. В пределе при $|\gamma(\tau_n - \tau_{n'})| \rightarrow 0$ и $I_n = I_{n'}$ имеем $P_{\text{eff}} = P_{\text{eff}}^{(0)} p$, где p – число пучков на выходе линии задержки. Линия задержки 5 в совокупности с линзой 6 и случайным фазовым модулятором 7 образуют устройство декогерентизации-гомогенизации исходного лазерного излучения за время порядка длительности импульса. Для пространственного рассогласования фаз пучков использовалась пластинка из кварца, одна из поверхностей которой имела мелкомасштабное хаотическое рифление.

Проецирование тест-объекта 9 на плоскость изображения осуществлялось объективом 10 «Бинар-266» производства НПО «Планар» (Белоруссия), рассчитанным на длину волны излучения $\lambda = 266$ нм с минимальным значением элемента разрешения 0.8 мкм. Числовая апертура объектива была равна 0.4, а его заднее фокусное расстояние составляло 8 мм. Из-за отсутствия приемника излучения с пространственным разрешением менее 0.8 мкм изображение тест-объекта строилось в увеличенном масштабе, для чего тест-объект располагался практически в фокальной плоскости объектива, за которым дополнительно устанавливалась линза 11, формирующая его изображение на конечном расстоянии. В качестве тест-объек-

та 9 использовался тонкий непрозрачный экран с резким краем. Изображение экрана регистрировалось линейным CCD-приемником 12 с минимальным пространственным разрешением ~ 14 мкм.

3. Результаты анализа уровня когерентных шумов в изображениях тест-объекта, формируемых в частично когерентном излучении

В ходе экспериментов изображение экрана регистрировалось при его освещении излучением с различной степенью пространственной когерентности, которая варьировалась путем помещения диафрагм различного диаметра внутрь резонатора лазера и изменения числа пучков линии задержки, формирующих вторичный источник. Степень пространственной когерентности излучения оценивалась по числу эффективных пространственно-когерентных мод P_{eff} в разложении пространственной функции взаимной интенсивности по собственным значениям и собственным функциям [19, 20]. Для гауссова вида пространственной функции взаимности интенсивности излучения величина P_{eff} связана с коэффициентом когерентности излучения $C = r/a$ (r – радиус когерентности излучения, a – радиус светового пучка в плоскости освещения) соотношением $P_{\text{eff}} = 1 + 2/C^2$ [21]. Экспериментально число пространственно-когерентных мод светового пучка можно определить, оценив отношение среднеквадратичного отклонения флуктуаций интенсивности излучения g к его средней интенсивности $\langle I \rangle$ в распределении интенсивности излучения, которое можно зарегистрировать за случайным фазовым модулятором с гауссовой статистикой фазовых неоднородностей, помещенным в пучок [22]. При этом

$$P_{\text{eff}} = 1/K^2, \quad (2)$$

где K – так называемый контраст спекл-структуры, равный $g/\langle I \rangle$.

Известно, что качество оптических изображений характеризуется двумя основными параметрами: частотно-контрастной характеристикой системы, формирующей изображение, и отношением сигнал/шум в самом изображении [23]. В когерентной оптике степень зашумленности изображений характеризуется параметром, обратным отношению сигнал/шум, который называют контрастом шума (спекл-шума). Величина шума принимается равной среднеквадратичному значению флуктуаций интенсивности в изображении освещенных участков предмета, а сигнал – средней интенсивности. Из соотношения (2) следует, что в случае гауссовой статистики пространственных флуктуаций фаз излучения в шумовом поле контраст шума определяется числом формирующих его пространственно-когерентных мод излучения.

На рис.3,а представлено распределение интенсивности в изображении непрозрачного экрана с резким краем, сформированное при его освещении излучением с $\lambda = 266$ нм, в отсутствие в схеме регистрации линии задержки 5, линзы 6 и фазового модулятора 7 (рис.1). При этом в резонаторе лазера находится диафрагма диаметром 1.5 мм. В полученном изображении наблюдается резкий всплеск интенсивности сразу же за неосвещенной областью изображения экрана. Появление всплеска обусловлено дифракцией излучения на краю экрана. В освещенной части

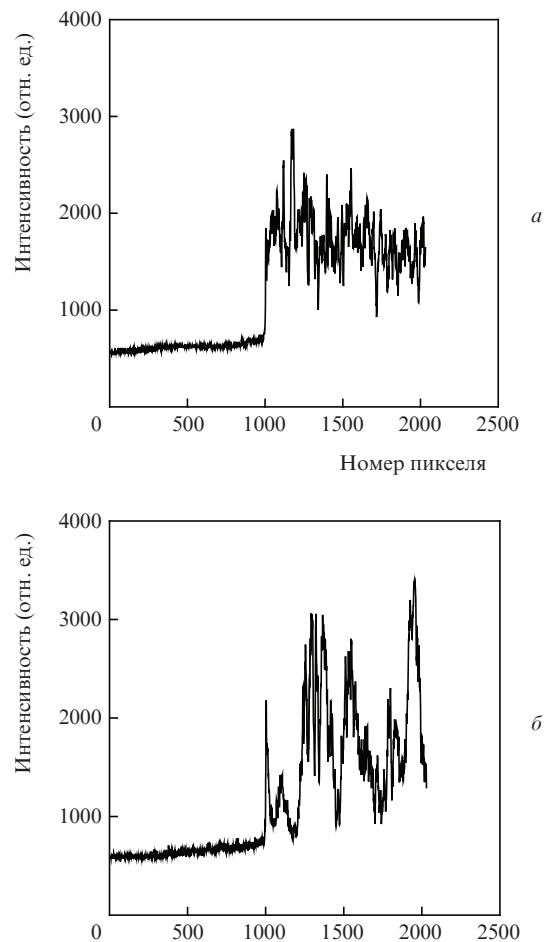


Рис.3. Распределения интенсивности в изображениях резкого края экрана, полученные при его освещении излучением с $P_{\text{eff}}^{(0)} = 3$, выходящим из удвоителя частоты (а) и прошедшим через случайно-неоднородную фазовую пластинку (б).

плоскости изображения экрана видны высокоамплитудные пространственные флуктуации интенсивности светового поля, связанные с пространственной неоднородностью интенсивности освещавшего экран излучения. Измеренный контраст наблюдаемого шума равен 0.26. Для оценки числа пространственно-когерентных мод излучения, участвовавших в формировании полученного изображения, было зарегистрировано изображение экрана при подсветке его тем же излучением, прошедшим через случайный фазовый модулятор 7 (см. рис.1). Вид данного изображения представлен на рис.3,б. Измеренный контраст спекл-шума в освещенной части изображения экрана составил 0.6. Соответственно число пространственно-когерентных мод исходного излучения равно ~ 3 .

В следующем эксперименте световой пучок, выходящий из удвоителя частоты, направлялся в линию задержки. На выходе ее формировался 81 парциальный пучок, причем оптический путь, проходимый каждым пучком, на Δl превышал оптический путь предыдущего пучка. Длина Δl выбиралась такой, чтобы модуль степени временной когерентности между ними был минимальным. Как видно из рис.2, данный интервал равен ~ 2.5 см. Пучки фокусировались линзой 6 на плоскость фазового модулятора 7 (рис.1), образуя вторичный источник, излучение которого затем переносилось линзой 8 в плоскость экрана 9. Фазовый модулятор осуществлял преобразование волновых фронтов парциальных пучков во фронты с от-

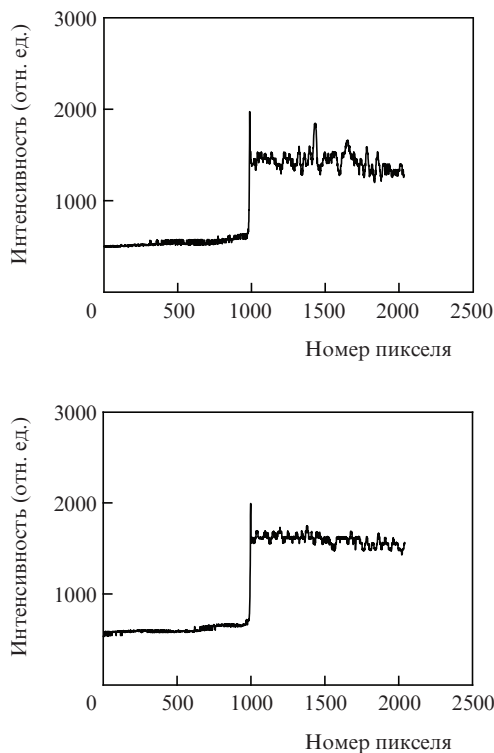


Рис.4. Распределения интенсивности в изображениях резкого края экрана, полученные при его освещении излучением, прошедшим через линию задержки 5 при $P_{\text{eff}}^{(0)} = 59$ (а) и $P_{\text{eff}}^{(0)} = 400$ (б).

личающимися пространственными распределениями фаз. Изображение края экрана, полученное при освещении его излучением созданного вторичного источника, представлено на рис.4,а.

Из рисунка видно, что общий вид пространственной структуры изображения экрана сохраняется таким же, как и на рис.3,а, т.е. в нем присутствуют дифракционный всплеск и флуктуации интенсивности излучения в освещенной части экрана. Однако уровень данных флуктуаций меньше, чем в изображении на рис.3. Контраст шума равен ~ 0.13 . Снижение уровня флуктуаций интенсивности связано с увеличением числа пространственно-когерентных мод (с уменьшением пространственной когерентности) излучения, освещающего экран. В процессе сглаживания шумов участвуют два механизма: временная ортогонализация парциальных световых пучков (формирование независимых пространственно-когерентных источников излучения), осуществляемая линией задержки, и пространственная ортогонализация их волновых фронтов при прохождении пучков через фазовый модулятор под разными углами. Результат сложения волновых фронтов в плоскости экрана при этом аналогичен хорошо известному эффекту усреднения за время регистрации пространственных флуктуаций интенсивности лазерного пучка, производимых внесенным в пучок вращающимся фазовым модулятором [19].

Достаточно большой контраст шума в изображении экрана, полученном в проведенном эксперименте, объясняется высокой остаточной временной когерентностью световых пучков, выходящих из линии задержки. Из рис.2 видно, что при $\Delta l = 2.5$ см временная когерентность между ними $|\gamma(\tau_n - \tau_n')| \sim 0.3$. В данном случае число освещающих экран эффективных пространственно-когерентных мод излучения $P_{\text{eff}} \cong 59$.

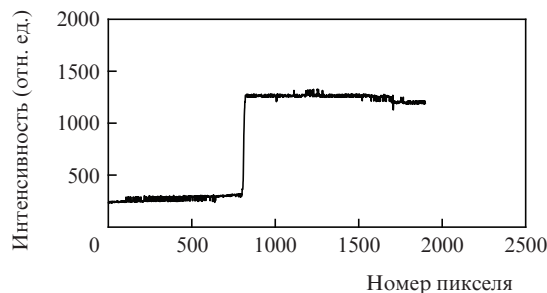


Рис.5. Распределение интенсивности в изображении резкого края экрана, полученное при освещении экрана некогерентным излучением.

Чтобы дополнительно снизить пространственную когерентность вторичного источника в рассматриваемой схеме, была убрана диафрагма из резонатора лазера. На рис.4,б представлено зарегистрированное распределение интенсивности в изображении экрана, соответствующее данному случаю его освещения.

Видно, что увеличение числа пространственно-когерентных мод освещающего экран излучения ведет к эффективному сглаживанию флуктуаций интенсивности в его изображении. Контраст остаточного шума равен ~ 0.05 , а $P_{\text{eff}} \cong 400$. Для сравнительной оценки степени однородности пространственного распределения интенсивности в изображении экрана, полученной в данном случае, на рис.5 приведено распределение интенсивности в изображении, зарегистрированном в некогерентном излучении при $P_{\text{eff}} \rightarrow \infty$. Источником некогерентного излучения служил светодиод марки 4603LXHLME1C фирмы LUXEON, излучавший «белый» свет. Наблюдаемая неоднородность интенсивности в освещенной области изображения экрана обусловлена фактически пространственной неоднородностью энергетической чувствительности отдельных пикселей CCD-камеры. Измеренный контраст данного «шума» равен 0.03. Это значение можно считать относительной погрешностью измерения используемой линейной CCD-камерой контраста шумов в изображениях, формируемых в частично когерентном излучении в рассматриваемой схеме макета фотолитографической установки.

4. Выводы

Результаты оценки контраста спекл-шумов в изображениях резкого края непрозрачного экрана, сформированных в модельной схеме фотолитографической установки, свидетельствуют об эффективном сглаживании пространственных флуктуаций интенсивности, обусловленных пространственной неоднородностью интенсивности исходного излучения источника. Гомогенизация излучения происходит вследствие уменьшения его пространственной когерентности разработанным декогерентизатором излучения. К достоинствам данного устройства можно отнести также возможность формирования с его помощью источников сложной формы для внеосевого освещения фотошаблона с целью увеличения пространственного разрешения схемы регистрации изображений.

1. Валиев К.А., Зайфарт Х, Ильяев Д.Р., Махвиладзе Т.М. *Математическое моделирование*, 2, 56 (1990).
2. Гурский В.Б., Пятецкий Р.Е. *Автометрия*, 2, 79 (1984).

3. Никитин А.В. *Прикладная физика*, **4**, 23 (1997).
4. Bernard D., Li J., Rey J., Axelrad V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2726**, 273 (1996).
5. Вознесенский Н.Б., Родионов С.А., Домненко В.М., Иванова Т.В. *Оптич. журн.*, **64** (3), 48 (1997).
6. Сейсян Р. *ЖТФ*, **75**, 1 (2005).
7. Салашенко Н.Н., Чхало Н.И. *Вестник РАН*, **78** (5), 450 (2008).
8. Анчуткин В., Бельский А., Гушин О. *Фотоника*, **1**, 11 (2010).
9. Jacob J.J., Litvin T., Merrian A.J. *United States Patent* US 6895149. Int.C1. G 02B 27/48, May 17, 2005.
10. Kleinschmidt J. *United States Patent* US 6898216. Int.C1. G 02B 27/48, May 24, 2005.
11. Kanti J. *Excimer Laser Lithography* (Bellingham, Washington: SPIE Press, 1989, pp.68, 114).
12. Gonting R.A., Vladimisky J. *United States Patent* US 7411687. Int.C1. G 02B 9/02, Aug.12, 2008.
13. Poultney S.K. *United States Patent* US 7595931. Int.C1. G 02B 5/18, Sep. 29, 2009.
14. Buckles R.G. *United States Patent* US 3633999. Int.C1. G 02B 27/14, Jan. 11, 1972.
15. Michaloski P.F., Stone B.D. *United States Patent* US 6191887. Int. C1. G 02B 5/30. Feb. 20, 2001.
16. Partlo W.N., Oldham W.G. *United States Patent* US 5233460. Int. C1. G 02B 27/28. Aug. 3, 1993.
17. Ивакин Е.В., Кицак А.И., Карелин Н.В., Лазарук А.М., Рубанов А.С. *Квантовая электроника*, **33**, 255 (2003).
18. Ивакин Е.В., Кицак А.И., Карелин Н.В., Лазарук А.М. *Патент ВУ №7273*. МКИ. G 02B. G 03H. 2005.
19. Мандель Л., Вольф Э. *Оптическая когерентность и квантовая оптика* (М.: Наука, 2000, с.203).
20. Карелин Н.В., Лазарук А.М. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **40**, 903 (1997).
21. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин Ф.С. *Введение в статистическую радиофизику и оптику* (М.: Наука, 1981, с.271).
22. Лещев А.А. *Оптика и спектроскопия*, **55**, 988 (1983).
23. Зэге Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. *Перенос изображения в рассеивающей среде* (Минск: Наука и техника, 1985, с.129).