

УДК 621.535

ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ В ПЛЁНКАХ ХРОМА ПОЛУТОНОВЫХ МИКРОИЗОБРАЖЕНИЙ С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ*

А. Г. Полещук, В. П. Корольков, А. Г. Седухин,
А. Р. Саметов, Р. В. Шиманский

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: poleshchuk.a.g.@iae.nsk.su*

Разработан и исследован метод прямой лазерной термохимической записи в тонких плёнках хрома полутоновых микроизображений. Метод включает в себя экспонирование плёнки хрома сфокусированным лазерным пучком с изменяющейся мощностью и проявку в селективном травителе. Получен диапазон изменения пропускания более чем в 100 раз. Нелинейность зависимости пропускания плёнки хрома от мощности экспонирующего пучка устраняется программной коррекцией. Экспериментально изготовлены образцы растра (64×64 , шаг 176 мкм) апертур (36 мкм) с полутоновым гауссовым пропусканием. Данный растр применён в модифицированном датчике Шэка — Гартмана.

Ключевые слова: лазерная запись, лазерное окисление, термохимические реакции, аподизация, датчик Шэка — Гартмана.

Введение. Полутоновая маска (ПМ) представляет собой оптическую подложку с тонким нанесённым слоем вещества, коэффициент пропускания которого плавно меняется по заданному закону, образуя полутоновое микроизображение.

Такие маски широко используются в оптике, микролитографии, голографии, системах обработки информации и др. Полутоновая литография [1], основанная на применении полутоновых фотошаблонов, играет ключевую роль при производстве высокоэффективных рельефно-фазовых дифракционных элементов [2]. Данная технология также используется для изготовления трёхмерных микромеханических структур (MEMS) [3] и микросистемной техники. Другое важное применение ПМ — это аподизация оптических систем [4].

Полутоновые маски должны удовлетворять следующим основным требованиям: иметь высокое пространственное разрешение ($>1000 \text{ мм}^{-1}$), большой динамический диапазон изменения коэффициента пропускания (или оптической плотности) ($>1:100$), малую толщину ($<0,1 \text{ мкм}$), высокую температурную, химическую и механическую устойчивость и достаточно простую и дешёвую технологию изготовления.

Ранее ПМ изготавливались с помощью фотографических эмульсий [5] и имели достаточно большую зернистость, толщину, малую механическую прочность и существенную усадку после жидкостного проявления.

Изготовление ПМ с помощью прямой электронно-лучевой или лазерной записи на специальных стёклах (HEBS, LDW) [6] или аморфным плёнкам (Si, Sn, In) [7, 8] позволяет

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-01118-а), Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004) и Сибирского отделения РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 112).

существенно упростить и улучшить процесс, однако эти стёкла дороги и не обеспечивают достаточного динамического диапазона изменения коэффициента пропускания.

Плёнки металлов являются удобным материалом для ПМ, поскольку высокая оптическая плотность достигается при относительно малой толщине плёнки. Так, при увеличении толщины плёнки хрома от 0 до 50 нм пропускание изменяется от 100 до 1 %. Однако известные методы изготовления металлических ПМ связаны с многоступенчатым процессом литографии, пошаговым нанесением [9] или травлением металлической плёнки, причём количество градаций пропускания остаётся ограниченным (8–16), так как определяется количеством ступенек [10].

В данной работе предлагается новый метод изготовления ПМ в плёнках хрома, основанный на прямой лазерной термохимической записи [11] в сочетании с селективным химическим травлением [12], и на эффекте изменения скорости растворения плёнок хрома в селективном травителе в зависимости от величины дозы лазерного облучения. Целью исследования является апробация возможности практической реализации ПМ в плёнках хрома, а также верификация возможности её применения в датчиках волнового фронта и экспериментальное сравнение полученных результатов с теоретическими.

Особенности лазерного экспонирования плёнок хрома. Согласно классической модели [11] термическое воздействие лазерного излучения на тонкие плёнки хрома приводит к наращиванию слоя окисла, изменяющего физико-химические свойства облучённой поверхности. Установлено [12], что кроме образования на поверхности плёнки окиси хрома, протекает ещё ряд процессов, например отжиг, рекристаллизация и частичное окисление плёнки на всю толщину. Этот вывод подтверждён результатами исследования кинетики травления облучённой и необлучённой плёнок хрома фотометрическим методом [13, 14].

На рис. 1 приведены типичные зависимости пропускания неэкспонированного и экспонированных участков плёнки хрома от времени травления в селективном травителе, который состоял из смеси шести частей 25 %-ного раствора $K_3Fe(CN)_6$ и одной части 25 %-ного раствора $NaOH$. Плёнка хрома с исходной толщиной около 70–80 нм наносилась на подложки из оптического стекла и экспонировалась (метод прямой лазерной записи [15]) сфокусированным лазерным пучком на установке CLWS-300IAE [2] в полярной системе координат. Мощность излучения P_{exp} при экспонировании ($\lambda = 488$ нм) выбиралась ниже границы плавления (критическая мощность P_{cr}). Экспонировалось несколько участков (порядка 5×5 мм) плёнки хрома с различной мощностью излучения и одинаковой скоростью сканирования. Коэффициенты мощности $K = P_{exp}/P_{cr}$ для участков, соответствующих кривым 2–4, выбирались в диапазонах 0,5–0,55, 0,6–0,7 и 0,8.

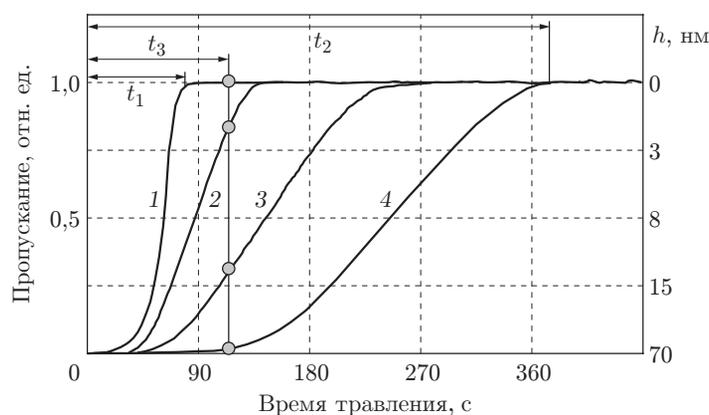


Рис. 1. Типичные зависимости пропускания неэкспонированной (кривая 1) и экспонированных (кривые 2–4) плёнок хрома от времени травления (h — эквивалентная толщина плёнки)

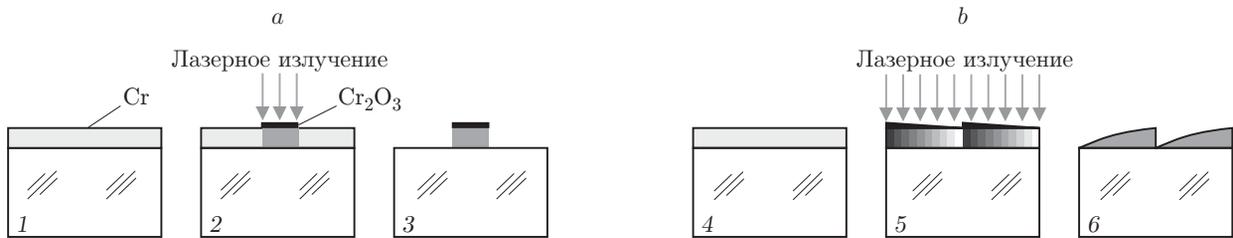


Рис. 2. Лазерные термохимические методы изготовления фотошаблонов: с бинарным (а) и полутоновым (b) пропусканиями. Этапы 1 и 4 — нанесение плёнки хрома, 2 и 5 — экспонирование, 3 и 6 — проявление в селективном травителе

Видно, что в зависимости от величины экспозиции время полного травления плёнок отличается в несколько раз (в 4 раза в данном эксперименте), а наклон кривой изменения пропускания становится существенно более пологим. Для изготовления фотошаблонов с бинарным пропусканием [13] время травления (t_1 на рис. 1) обычно выбирают так, чтобы неэкспонированный хром растворился (кривая 1), а экспонированный (например, кривая 4) за это время остался нетронутым. Однако, если время травления немного изменить (например, выбрать t_3), то по приведённому семейству кривых видно, что пропускание участков плёнки хрома будет различным (отмечено кружками). Нами было предложено использовать этот эффект для изготовления ПМ методом прямой лазерной записи.

На рис. 2 показаны основные этапы изготовления хромовых фотошаблонов.

Экспериментальное изучение полутоновой записи. Задачей данного исследования является определение взаимосвязи условий экспонирования (мощности записывающего пучка, шага записи, скорости сканирования и т. д.) с коэффициентом пропускания проявленной плёнки хрома, а также выявление факторов, влияющих на воспроизводимость результата записи.

В наших экспериментах использовались стандартные хромовые фотошаблоны (127 × 127 мм) производства ЗАО «Элма-Фотма» (г. Зеленоград). Экспонирование осуществлялось на установке CLWS-300IAE сфокусированным лазерным пучком (0,6 мкм HWHM, $\lambda = 532$ нм) при непрерывном вращении фотошаблона (12 об/с) и радиальном перемещении пучка с шагом 0,5 мкм. Управление мощностью экспонирующего излучения осуществлялось компьютером с помощью заданной программы.

Размер области записи ПМ 12 × 12 мм. Полутоновая маска представляла собой прямоугольный растр (шаг 176 × 176 мкм) одинаковых апертур с гауссовым пропусканием. Размер каждой апертуры 36 мкм на уровне $\exp(-2)$. Изготовление ПМ проводилось в два этапа. На первом этапе на пластине с плёнкой хрома по обе стороны от области записи ПМ формировались тестовые структуры (рис. 3, а) в виде полутонового клина (50 × 800 мкм), состоящего из 16 градаций серого. Затем пластина проявлялась в селективном травителе и проводились измерения пропускания «на просвет» элементов тестовой структуры (микроскоп "Interfak", объектив 20×, камера "Basler"), как показано на рис. 3, б. Видно, что кривая пропускания нелинейна в области чёрного. Далее, при измерении отклонения (например, величины δ_1 на координате 480 мкм) от заданной линейной зависимости (штриховая прямая) данные использовались для коррекции мощности при записи следующей маски. На рис. 3, с, d показаны экспериментальная структура и график её пропускания на второй пластине при записи со скорректированной мощностью. Видно, что функция пропускания стала более линейной.

На рис. 4 представлены результаты изготовления ПМ и исследования её оптических характеристик. На фрагменте (рис. 4, б) видна паразитная периодическая структура, об-

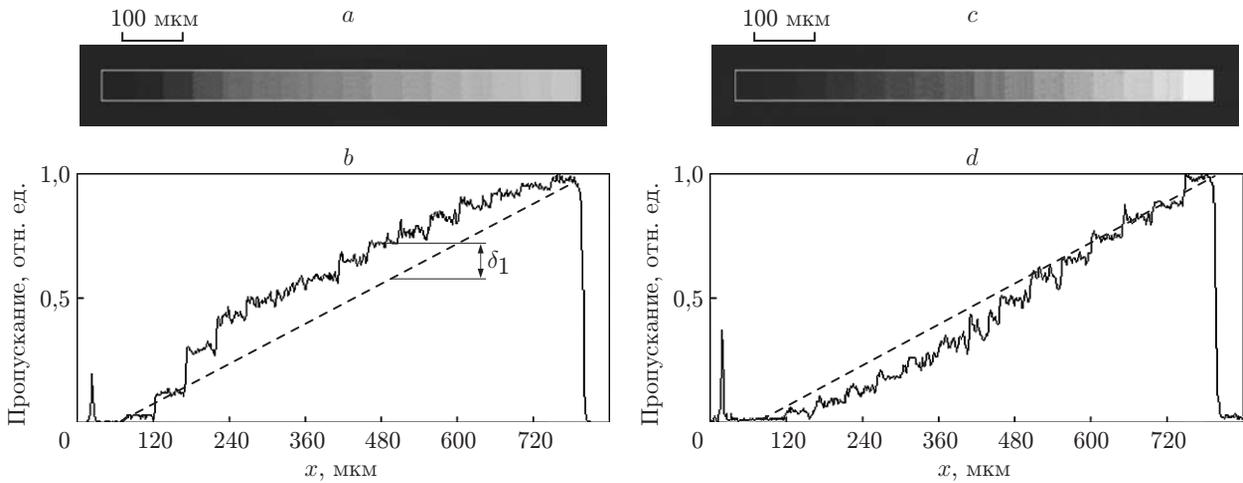


Рис. 3. Тестовые структуры ПМ: фотографии (а, с) и графики пропускания (b, d) полутоновых тестовых структур

условленная влиянием ошибок дискретизации и проявляющаяся в виде эффекта Муара. Форма кривой пропускания апертуры (рис. 4, с) близка к теоретически заданной.

Применение полутоновой маски в датчике волнового фронта Шэка — Гартмана. Датчики Шэка — Гартмана (ДШГ) широко используются для анализа формы волнового фронта лазерного излучения, так как отличаются простотой конструкции и малыми габаритами. Эти датчики состоят из двух элементов: микролинзового раstra и цифровой видеокамеры [16]. Однако при анализе излучения мощных лазеров нет необходимости в применении микролинзового раstra, роль которого заключается в увеличении чувствительности ДШГ. Наоборот, стоит задача ослабления излучения, чтобы не повредить сенсор видеокамеры. В этой связи нами предложен и разработан новый вариант ДШГ с маской, состоящей из двумерной матрицы отверстий с гауссовой функцией пропускания. Такая функция обеспечивает аподизацию распределения интенсивности света в плоскости сенсора и существенно снижает уровень перекрёстных помех между смежными оптичес-

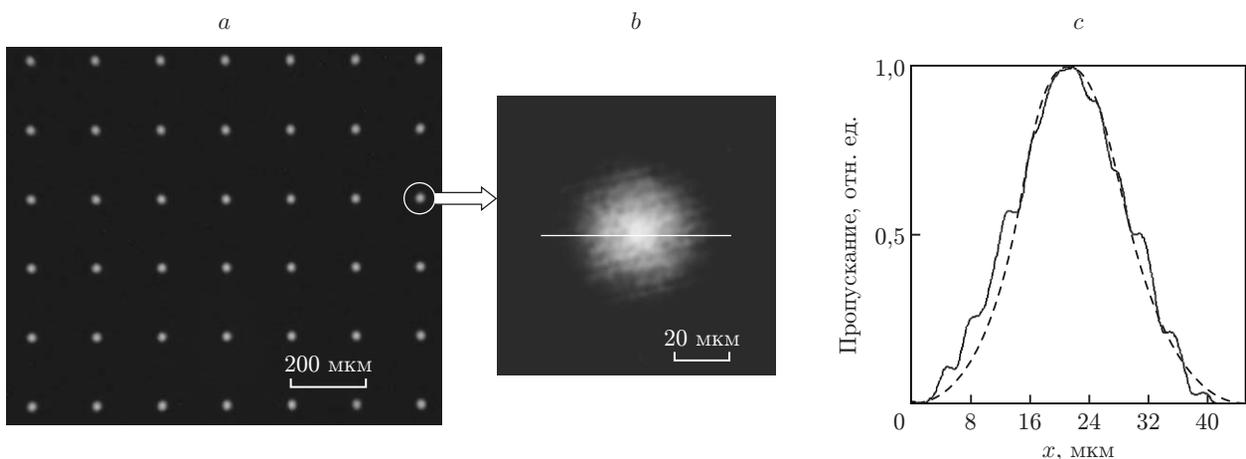


Рис. 4. Результаты изготовления ПМ: а — фотография области с ПМ, b — увеличенное изображение одной из полутоновых апертур, с — график пропускания в поперечном сечении (штриховая кривая — заданное пропускание)

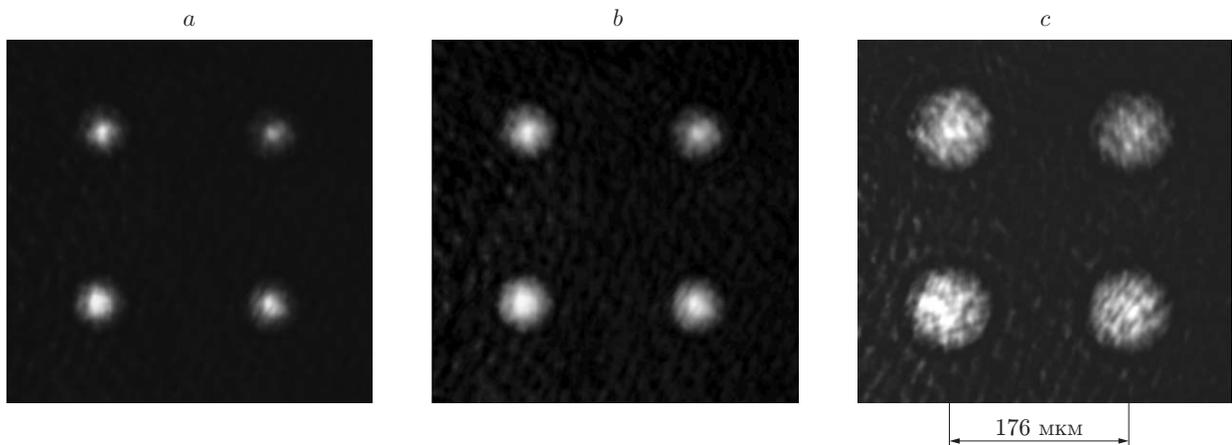


Рис. 5. Фотографии распределения оптического излучения на расстояниях 0, 1 и 2 мм от ПМ

кими каналами. Это позволяет осуществить более плотное размещение ячеек на маске Гартмана и реализовать повышенное разрешение при контроле волнового фронта.

Нами установлено, что оптимальный радиус гауссовых отверстий по уровню падения пропускания $\exp(-2) = 13,5\%$ составляет $r_{\Gamma} = \sqrt{\lambda z/\pi}$, где λ — средняя длина волны, z — расстояние между маской Гартмана и плоскостью фотоматрицы. На участке от маски Гартмана до фотоматрицы при расстоянии z , соответствующем расстоянию Рэлея, прошедший гауссов пучок уширится в $\sqrt{2}$ раз.

В разработанном образце модифицированного датчика Гартмана применена маска в виде двумерного массива отверстий размером 64×64 и с гауссовым распределением оптического пропускания по отдельным отверстиям размером по уровню падения пропускания $\exp(-2) = 36$ мкм. В качестве сенсора использована фотоматрица однойюймовой видеока-

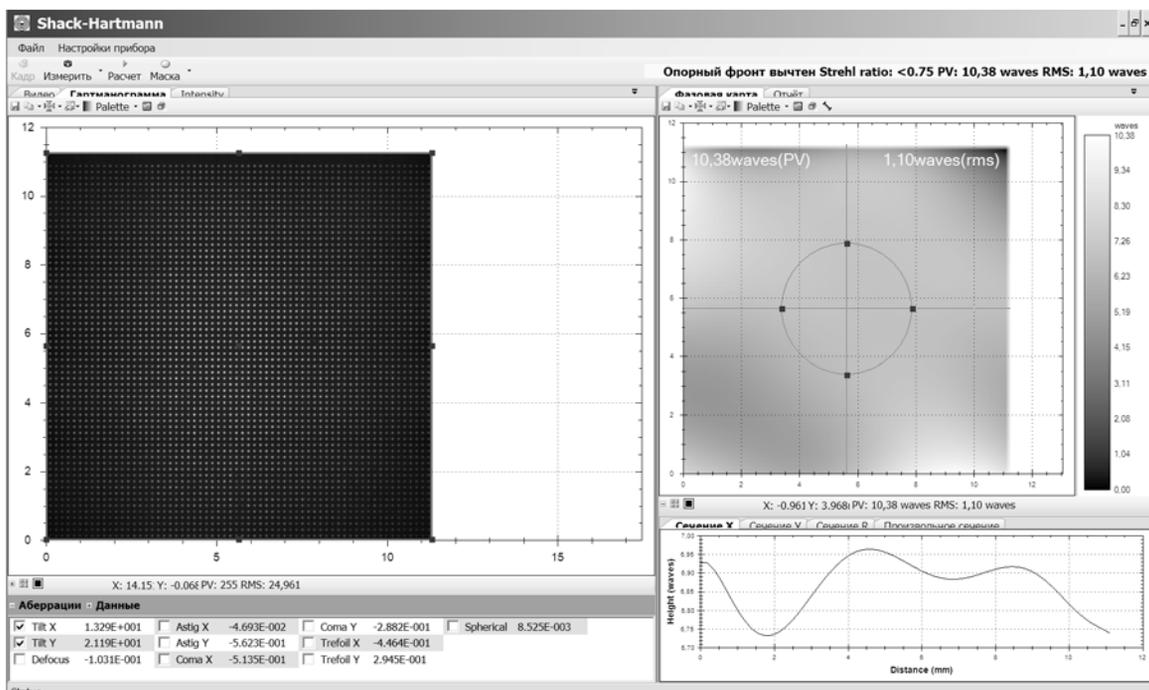


Рис. 6. Оценка по гартманограмме деформации плоского волнового фронта

меры "GigE" с полем $11,264 \times 11,264$ мм и разрешением 2048×2048 пикселей. Расстояние между модифицированной маской Гартмана и фотоматрицей составляло 2 мм при средней длине волны анализируемого волнового поля $\lambda = 532$ нм.

На рис. 5 приведены фотографии фрагментов распределения интенсивности оптического излучения на расстоянии 0, 1 и 2 мм от плоскости ПМ при одинаковом масштабе изображений. Видно, что диаметр световых пятен увеличивается пропорционально расстоянию (38, 62 и 80 мкм соответственно), однако дифракционные кольца отсутствуют. Плоскость установки сенсора видекамеры соответствует изображению на рис. 5, с.

Экспериментальный образец модифицированного ДШГ был собран с применением описанного раstra полутонных апертур и цифровой видекамеры "Basler". На рис. 6 показано восстановление карты волнового фронта, полученной с помощью этого датчика. Форма волнового фронта оценивалась с использованием программы, в основу которой положено представление поверхности волнового фронта в виде разложения в ряд по полиномам Цернике с неизвестными коэффициентами [17].

Заключение. Впервые разработан и исследован метод изготовления хромовых ПМ на базе лазерного термохимического метода записи. Метод включает в себя два основных этапа: экспонирование плёнки хрома сфокусированным лазерным пучком с изменяющейся мощностью и проявку в селективном травителе. Получен диапазон изменения пропускания более чем в 100 раз. Нелинейность зависимости пропускания плёнки хрома от мощности экспонирующего пучка устраняется программной коррекцией. Экспериментально изготовлены образцы ПМ раstra (64×64 гауссовых апертуры), применённого в модифицированном датчике Шэка — Гартмана для контроля формы волнового фронта мощных лазерных систем.

Авторы благодарят коллектив Лаборатории дифракционной оптики (Институт автоматки и электрометрии СО РАН) за помощь в проведении экспериментальных работ, а также д-ра физ.-мат. наук В. А. Тартаковского и В. Г. Максимова (Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН) за предоставление программы обработки гартманограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Christophersen M., Philips B. F.** Gray-tone lithography using an optical diffuser and a contact aligner // *Appl. Phys. Lett.* 2008. **92**, N 19. 194102.
2. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // *Appl. Opt.* 1999. **38**, N 8. P. 1295–1301.
3. **Waits C. M., Modafe A., Ghodssi R.** Investigation of gray-scale technology for large area 3D silicon MEMS structures // *Journ. Micromech. Microeng.* 2003. **13**, N 2. P. 170–177.
4. **Полещук А. Г., Седухин А. Г., Никаноров Н. Ю.** Апертурная аподизация на регулярных решётках с переменным пропусканием в нулевом порядке дифракции // *Автометрия.* 2013. **49**, № 6. С. 86–97.
5. **Anderson H., Ekberg M., Hard S. et al.** Single photomask, multilevel kinoforms in quartz and photoresist: manufacture and evaluation // *Appl. Opt.* 1990. **29**, N 28. P. 4259–4264.
6. **Korolkov V. P., Malyshev A. I., Nikitin V. G. et al.** Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs // *Proc. SPIE.* 1999. **3633**. P. 129–138.
7. **Gotchiyaev V. Z., Korolkov V. P., Sokolov A. P., Chernukhin V. P.** High resolution optical recording on a-Si films // *Journ. Non-Cryst. Solids.* 1991. **137–138**, Pt. 2. P. 1297–1300.
8. **Guo C. F., Cao S., Jiang P. et al.** Grayscale photomask fabricated by laser direct writing in metallic nano-films // *Opt. Express.* 2009. **17**, Is. 22. P. 19981–19987.

9. **Iannone E.** Labs on Chip: Principles, Design, and Technology. Boca Raton: CRC Press, 2015. 1178 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=wLSBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false> (дата обращения: 7.05.2014).
10. **Ion J. C.** Laser Processing of Engineering Materials — Principles, Procedure and Industrial Application. Burlington: Elsevier, 2005. 556 p.
11. **Вейко В. П., Котов Г. А., Либенсон М. Н., Никитин М. Н.** Термохимическое действие лазерного излучения // ДАН СССР. 1973. **208**. С. 587–590.
12. **Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И.** Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома // Письма в ЖТФ. 1985. **11**, № 3. С. 144–148.
13. **Вейко В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. и др.** Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур // Квантовая электроника. 2011. **41**, № 7. С. 631–636.
14. **Cherkashin V. A., Churin E. G., Burge J. H. et al.** Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films // Proc. SPIE. 1997. **3010**. P. 168–179.
15. **Полещук А. Г., Саметов А. Р., Седухин А. Г.** Многопучковая лазерная запись дифракционных оптических элементов // Автометрия. 2012. **48**, № 4. С. 3–11.
16. **Лукин В. П., Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н. и др.** Датчик Шэка — Гартмана на основе раstra низкоапертурных внеосевых дифракционных линз // Автометрия. 2009. **45**, № 2. С. 88–98.
17. **Полещук А. Г., Седухин А. Г., Максимов В. Г. и др.** Датчик Шака — Гартмана — как элемент системы контроля высокомошных лазерных пучков // Сб. матер. Междунар. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013». Новосибирск, 2013. Т. 5, № 3. С. 93–97.

Поступила в редакцию 7 мая 2014 г.
