

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С БИНАРНЫМ ВЫСОКОКОНТРАСТНЫМ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ ПРОПУСКАНИЕМ

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, д.т.н., зам. директора ИАиЭ СО РАН, тел. (383) 333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

Андрей Георгиевич Седухин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, к.т.н., в.н.с., тел. (383) 333-30-91, e-mail: sedukhin@iae.nsk.ru

Никита Андреевич Гурин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, и.о. инженера-исследователя, тел. (383) 330-51-34, e-mail: gna200694@yandex.ru

Анатолий Иванович Малышев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, ведущий инженер-технолог, тел. (383) 333-30-91; e-mail: malyshev@iae.nsk.ru

Предложен метод формирования на одной подложке двух наложенных друг на друга оптических структур – бинарной фазовой структуры и аналоговой амплитудной высококонтрастной структуры, выполненной на толстой хромовой пленке в виде регулярной двумерной дифракционной решетки нулевого порядка с изменяющимся локальным коэффициентом заполнения ячеек. Метод основан на прямой лазерной записи на фоторезисте и реактивном ионном травлении. Проведено численное и экспериментальное исследование данного метода, применительно к оптическому транспаранту, используемому в оптической системе для генерации структуры гамма-связанного лазерного пучка. Экспериментально достигнуто пригодное для практического применения качество высококонтрастной структуры, при оптической плотности хромовой пленки около $D_{4.3}$ и при минимальных размерах прозрачных и непрозрачных окон порядка 1×1 мкм². Данный метод может быть использован для синтеза амплитудно-фазовых транспарантов с большим знакопеременным диапазоном изменения коэффициента амплитудного оптического пропускания, при относительно медленном (плавном) изменении коэффициента пропускания (с несущей пространственной частотой амплитудной модуляции, определяемой периодом вышеназванной двумерной дифракционной решетки нулевого порядка).

Ключевые слова: прямая лазерная запись, реактивное ионное травление, фоторезисты, пленки хрома, решетки нулевого порядка

INVESTIGATION OF THE METHOD OF DIRECT LASER WRITING OF OPTICAL ELEMENTS WITH BINARY HIGH-CONTRAST AMPLITUDE-PHASE TRANSMISSION

Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Assistant Director, phone: (383) 333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

Andrey G. Sedukhin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Leading Researcher Scientist, phone: (383) 333-30-91, e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Nikita A. Gurin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Acting Research Engineer, phone: (383) 330-51-34, e-mail: gna200694@yandex.ru

Anatoliy I. Malyshev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Process Engineer, phone: (383) 333-30-91; e-mail: malyshev@iae.nsk.su

A method is proposed for formation on one substrate of two superimposed optical structures – a binary phase structure and an analog high-contrast amplitude structure made on a thick chromium film in the form of a regular two-dimensional zero-order diffraction grating with a variable fill-factor of cells. A numerical and experimental study of this method is carried out as applied to an optical transparency for generating the structure of a gamma-coupled laser beam. The quality of a high-contrast structure, suitable for practical application, was experimentally achieved, with an optical density of a chromium film of about 4.3, when measured at a wavelength of 532 nm, and with a minimum size of transparent and opaque windows of the order of $1 \times 1 \mu\text{m}^2$. This method can be used to synthesize amplitude-phase transparencies with a large alternating range of change in the amplitude optical transmittance, with a relatively slow (smooth) change in the transmittance (with the carrier spatial frequency of the amplitude modulation determined by the period of the above two-dimensional zero-order diffraction grating).

Keywords: direct laser writing, photoresists, chromium films, zero-order gratings

Введение

При решении задач воспроизведения плавного, но знакопеременного, амплитудного профиля лазерных пучков (в их перетяжке либо в дальней зоне), возникает необходимость в синтезе оптических транспарантов с функцией пропускания, идентичной названному профилю [1,2]. Данные транспаранты могут использоваться, например, для внерезонаторной генерации осесимметричных гауссово-подобных и бесселе-подобных лазерных пучков, имеющих повышенную степень пространственной локализации в области фокусировки и названных по описывающим их функциям гамма и гамма-связанными пучками.

По одному из вариантов [1], при экспериментальном воспроизведении профиля гамма-связанного пучка в дальней зоне, для соответствующей оптики можно применить положительную Фурье-линзу и два оптически-сопряженных транспаранта, один из которых осуществляет аналоговую амплитудную модуляцию интенсивности опорного лазерного пучка, а другой – дискретную фазовую модуляцию опорного пучка, в соответствии со знаком амплитудного профиля. По расчетным оценкам, для воспроизведения допустимого минимально искаженного профиля гамма-связанного пучка, необходимо обеспечить непрерывное, высокоточное, контролируемое изменение оптической плотности амплитудного транспаранта в пределах от 0 (при полном пропускании) до значения не менее 4, с дискретностью изменения плотности не более $1/2^6$. Столь высокий кон-

траст зон амплитудного транспаранта и столь малая нелинейность воспроизведения оптической плотности практически не достижимы при использовании традиционных методов изготовления металлизированных амплитудных масок с изменением пропускания за счет изменения толщины их металлических пленок.

Метод прямой лазерной записи элементов с бинарным высококонтрастным амплитудно-фазовым пропусканием

Для упрощения оптической системы из двух вышеуказанных транспарантов и повышения точностных характеристик такой системы, в настоящей работе предлагается совместить структуры обоих транспарантов и выполнить их на одной подложке, а для выполнения структуры амплитудного транспаранта использовать метод аподизации светового пучка с помощью амплитудных регулярных решеток нулевого порядка [3]. При этом, запись совмещенной структуры, может быть проведена на лазерном фотопостроителе CLWS-300 (работающим в полярной системе координат), с помощью следующих последовательных операций. Нанесение тонкой хромовой пленки на подложку (с толщиной менее 50 нм); прямая лазерная запись по хрому и формирование бинарно-фазовой структуры, с использованием термохимической технологии и реактивного ионного травления; нанесение на подложку толстой хромовой пленки (с оптической плотностью более 4D и толщиной более 150 нм); нанесение фоторезиста; повторная установка шаблона на фотопостроитель и центрирование шаблона по референтным окружностям, с привязкой к центру записанной бинарно-фазовой структуры; лазерная запись по фоторезисту бинарно-амплитудной двумерной регулярной дифракционной решетки, пропускание которой в нулевом порядке дифракции имитирует непрерывную амплитудную структуру и воспроизводит квадрат модуля синтезируемого профиля интенсивности; жидкостное травление экспонированного фоторезиста; жидкостное травление толстой пленки хрома, не защищенной оставшимся фоторезистом; удаление фоторезиста.

Применение фоторезиста на втором этапе лазерной записи вызвано стремлением избежать растрескивания толстой пленки хрома при лазерном облучении во время записи. Данная процедура записи элементов была испытана экспериментально, применительно к синтезу структуры параметрически-оптимизированного гамма-связанного пучка, описанного в [2] и имеющего обозначение комплексной амплитуды $\psi_{0,0,-2}^{(gc)}(\rho, \zeta)$. Период зон двумерной дифракционной структуры составлял порядка 60 мкм. Для отработки полного технологического цикла синтеза описанной структуры, с целью проверки разрешающей способности записи, было проведено близкое искусственное совмещение участков, на которых наблюдаются прозрачные окна с минимальными размерами на стекле, свободном от хромовой пленки. Размеры таких окон составляют порядка 1×1 мкм². На рис. 1 показан фрагмент экспериментально синтезированной структуры в проходящем свете, полученный с помощью стандартного биологического микроскопа.

Микроскопический анализ синтезированной структуры с бинарным высококонтрастным амплитудно-фазовым пропусканием и с минимальными размерами прозрачных и непрозрачных окон порядка 1×1 мкм² продемонстрировал хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Контроль контраста пропускания зон амплитудной структуры также показал хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Так, измеренная максимальная плотность пропускания зон структуры составила порядка 4,3 (при измерении на длине волны 532 нм) при максимальном искажении краев зон порядка 0,3 мкм.

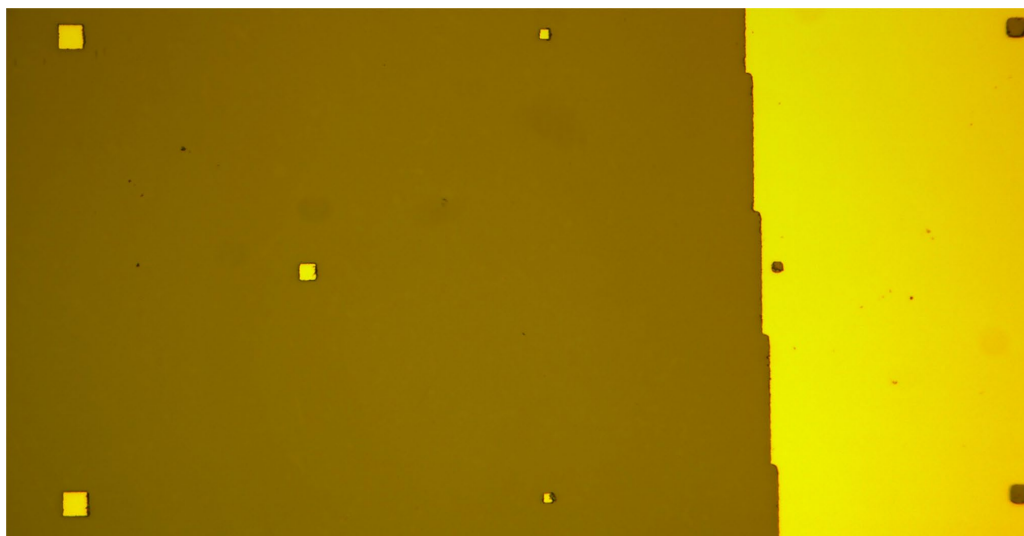


Рис. 1. Увеличенный фрагмент синтезированной структуры

Заключение

Проведенный эксперимент по лазерной записи структуры с бинарным высококонтрастным амплитудно-фазовым пропусканием, а также по микроскопическому анализу такой структуры показал достаточно хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. Это свидетельствует о возможности использования описанного метода для записи транспарантов с комбинированной структурой, пригодных для генерации вышеуказанных гамма-связанных лазерных пучков.

Благодарности

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 17-19-01721-П. Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (гос. регистрационный № 121041500060-2). В исследовании использовалось оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sedukhin, A.G. Gamma and gamma-coupled beams // Appl. Opt. – 2018. – Vol. 57(14). – P. 3653–3660.
2. Sedukhin, A.G. Extending a set of well-focused beams described by gamma and gamma-coupled functions // Appl. Opt. – 2018. – Vol. 57(30).
3. Полещук, А.Г. Апертурная аподизация на регулярных решетках с переменным пропусканием в нулевом порядке дифракции / А.Г. Полещук, А.Г. Седухин, Н.Ю. Никаноров // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 6. – С. 86-97.

© В. П. Корольков, А. Г. Седухин, Н. А. Гурин, А. И. Малышев, 2021