

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ТОРЦЕ ГАЛОГЕНИДНОГО ИК-ВОЛНОВОДА

Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л., Карпеев С.В., Моисеев О.Ю.,
Павельев В.С., Якуненкова Д.М., Рунков Ю.А., Головашкин Д.Л.
Самарский государственный аэрокосмический университет
Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы формирования дифракционного микро рельефа на торце галогенидного ИК-волновода с целью управления излучением, выходящим из волновода. Приведены результаты первых экспериментов по формированию и исследованию дифракционной бинарной решетки на торце волновода с помощью технологии горячей штамповки.

Введение

Широкое применение оптических волноводов в лазерных технологиях и системах связи определяет актуальность задачи управления волноводным излучением. В работах [1, 2] рассмотрена задача управления модовым составом волновода с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ).

Дифракционный оптический элемент представляет собой тонкую пластину из прозрачного материала, на одну (или обе) из сторон которой нанесен микро рельеф [3]. Безусловным недостатком подхода [1] является необходимость юстировки и громоздкость оптических систем для ввода-вывода излучения, включающих ДОЭ, а также наличие нескольких дополнительных преломляющих поверхностей, приводящих к потерям энергии излучения.

Выходом из этой ситуации явилось бы непосредственное формирование дифракционного микро рельефа на торце волновода, что к тому же позволило бы добиться существенной миниатюризации.

В работах [4, 5] рассмотрено формирование дифракционного микро рельефа на торце волновода для фокусировки выходящего волноводного излучения в заданную область (прямоугольник) [4] и управление фазой выходящего излучения [5].

Отметим, что технологическая трудность формирования микро рельефа на торце волновода не в последнюю очередь определяется длиной волны излучения и, соответственно, диаметром сердечника волновода.

Данная работа посвящена исследованию возможности формирования дифракционного микро рельефа с помощью технологии горячей штамповки на торце галогенидного ИК-волновода (в качестве расчетной длины волны выбиралась рабочая длина волны CO_2 лазера $\lambda=10,6$ мкм).

1. Изготовление матрицы с помощью технологии фотолитографии

Формирование микро рельефа с помощью такого подхода происходит в два этапа:

- изготовление матрицы с помощью технологии фотолитографии;
- перенос рельефа с матрицы на материал торца волновода.

В качестве тестовой задачи была выбрана задача формирования бинарной дифракционной решетки (которая может быть использована в качестве делителя пучка выходящего волноводного излучения) с периодом $d=30$ и 60 мкм и отношением ширины штриха к периоду $0,5$ на торце волокна (Рис. 1).

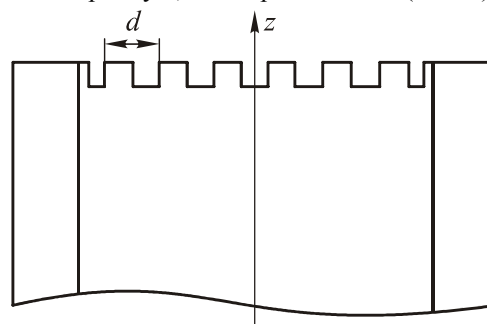


Рис. 1. Формирование бинарного рельефа на торце волновода

Для изготовления микро рельефа использовался фотолитографический процесс, общее описание которого дано, например, в [6]. Стеклоподложки оптического качества очищались от органических загрязнений с помощью концентрированного раствора щелочи, после чего промывались в дистиллированной воде. Удаление неорганических загрязнений производилось путем кипячения подложек в растворе серной кислоты с добавлением двухромовокислого калия в течение 2 часов, с последующим промыванием дистиллированной водой.

Очищенные подложки сушились в муфельной печи, а для улучшения адгезии на их поверхность наносился в вакууме адгезив (праймер) [7].

Фоторезист марки ФП3513 наносился на обработанную поверхность центрифугированием на скорости 4000 об/мин. в течение $20-30$ секунд. Толщина нанесенного слоя варьировалась по площади подложки в пределах $1,0-1,1$ мкм, сушка производилась в печи при температуре 85°C . Затем подложка с нанесенным фотослоем засвечивалась УФ-излучением через фотосаблон в установке совмещения и экспонирования ЭМ-5006. Время экспонирования выбиралось в зависимости от толщины фотослоя и составляло порядка $45-50$ с.

Проявка осуществлялась в стандартном щелочном проявителе в течение 1-2 минут. После промывки полученная подложка с проявленным изображением на фотослое подвергалась двуступенчатому термозадубливанию при температуре 120-180 С°.

Качество рельефа фотомаски после проявки и термозадубливания проверялось с помощью интерференционного микроскопа Линника МИИ-4 и интерферометрического профилометра WLI (Fraunhofer-Institution for Applied Optics and Precision Engineering, Йена, Германия), принцип работы интерферометрического профилометра WLI, описан, например, в [8]. Результаты исследования полученного микрорельефа приведены на рис. 2.

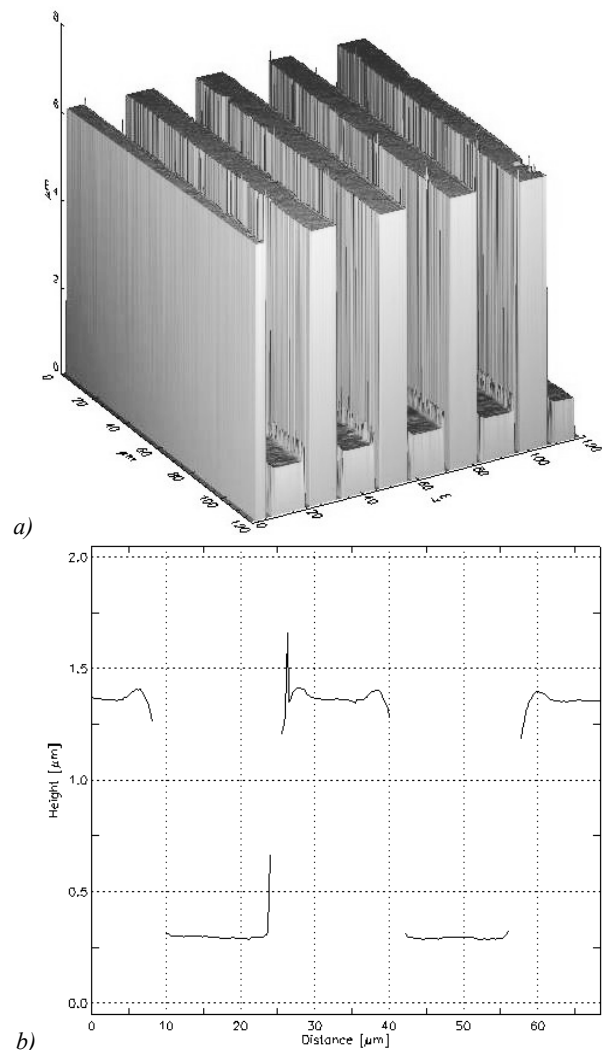


Рис. 2. Результаты исследования микрорельефа, реализованного на фоторезисте

Воспроизведенное изображение в слое фоторезиста переносилось в стеклянную подложку с помощью жидкостного химического травления, для чего использовался раствор плавиковой кислоты. Концентрация раствора подбирались таким образом, чтобы обеспечить достаточно высокую скорость травления стекла при максимальной стойкости фоторезиста. Процесс периодически контролировался анализатором и занимал от 10 до 15 мин.

Процесс травления завершался удалением фотомаски этилацетатом и промыванием подложки дистиллированной водой.

Окончательная проверка глубины и качества травления микрорельефа на подложке производилась также с помощью микроскопа МИИ-4 и интерферометрического профилометра WLI (рис. 3).

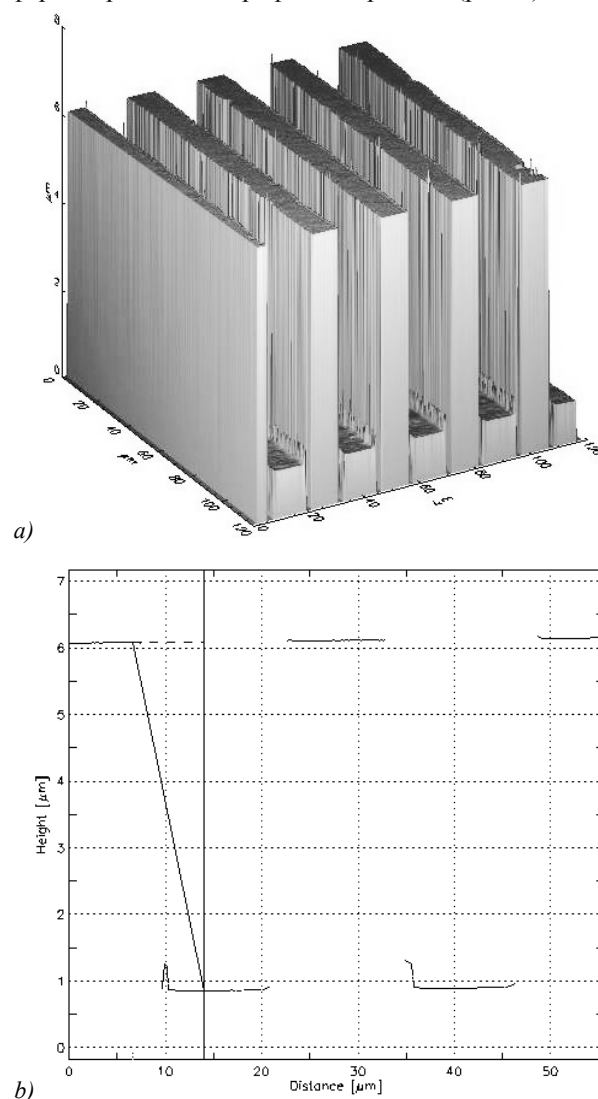


Рис. 3. Результаты исследования микрорельефа, реализованного на поверхности стекла

2. Формирование рельефа на торце волновода

Для постановки экспериментов были выбраны волноводы из галогенидов серебра со значением показателя преломления сердцевины $n=2$.

Высота микрорельефа, соответствующего изменению фазы пучка на π радиан, составляла

$$h = \frac{\lambda}{2(n-1)} = 10,6 \text{ мкм} / 2 = 5,3 \text{ мкм}. \quad (1)$$

Для штамповки рельефов на торцах волноводов была собрана установка, объединяющая в себе микроскоп, телекамеру, трехкоординатный столик и нагревательное устройство с цифровым контролем

температуры (рис. 4). Начальная фаза процесса штамповки показана на рис. 5.



Рис. 4. Установка для штамповки рельефа на торце ИК-волновода

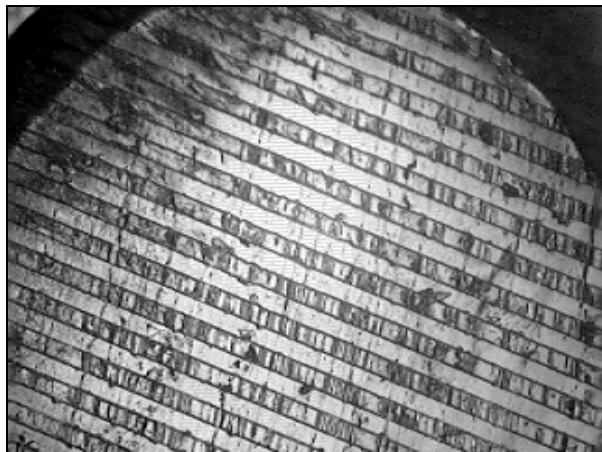


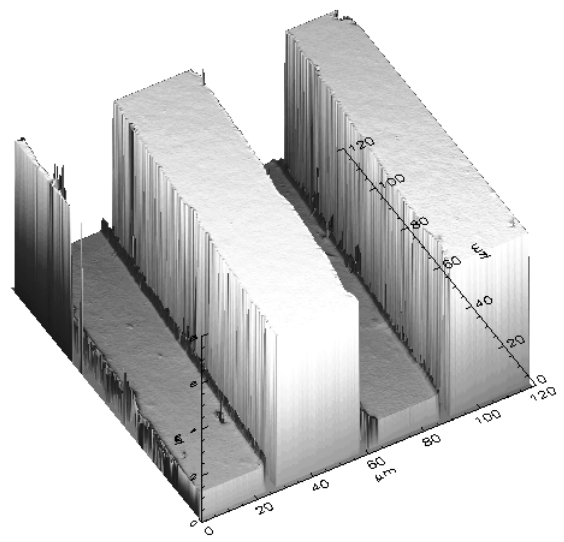
Рис. 5. Начальная фаза процесса горячей штамповки на экране монитора

Для получения наилучших результатов штамповки температура нагревательного элемента выбиралась в диапазоне 160°C - 390°C .

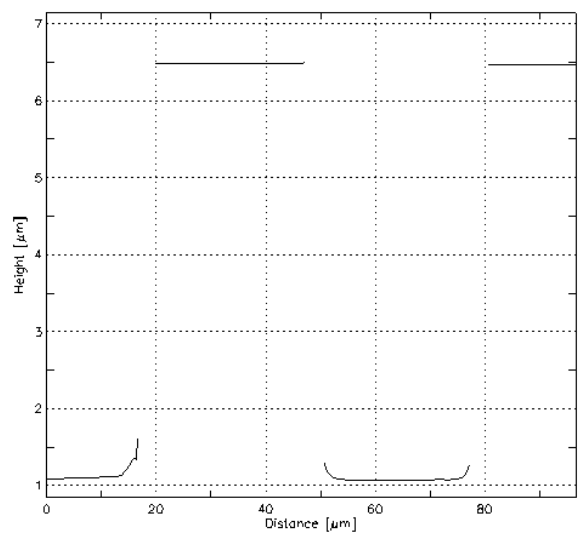
Следует отметить, что реально, в зоне штамповки, температура была немного меньше из-за конечной теплопроводности стеклянной матрицы и наличия теплоотдачи с окружающей средой.

С учетом диаметра оптоволокна (вместе с оболочкой) в 1,3 мм давление штамповки было в пределах $0,3 \text{ кГ/мм}^2$ (30 кГ/см^2). Дальнейшее увеличение давления приводило к деформации световода, особенно в области торца. Полученные рельефы представлены на рис. 6,7.

На рис. 6 и 7 видно, что полученные рельефы хорошо повторяют исходные рельефы матриц, практически не наблюдается усадка материала, разделение матрицы и торца волокна происходит без разрушения материала световода, однако погрешности используемой технологии (в частности, завал края) приводят к определенным отклонениям формируемого микрорельефа от расчетного.



a)



b)

Рис. 6. Результаты исследования реализованного микрорельефа на торце ИК волновода (период сформированной дифракционной решетки – 60 мкм)

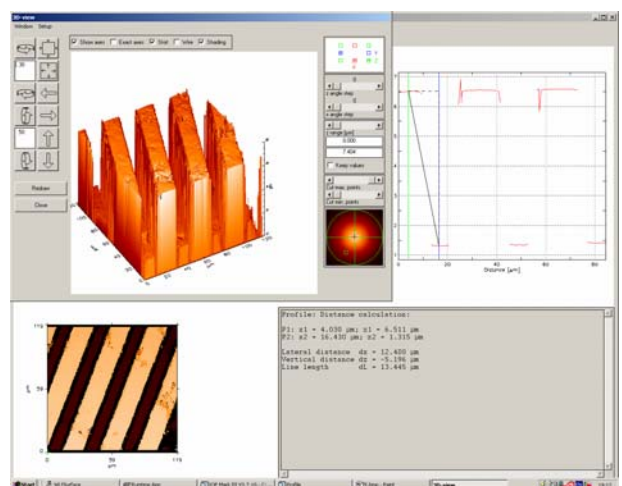


Рис. 7. Результаты исследования реализованного микрорельефа на торце ИК волновода (период сформированной дифракционной решетки – 30 мкм)

В частности, отношение ширины канавки решетки к периоду для реализованного рельефа вместо 0,5 составляло около 0,3, что ведет к появлению нулевого дифракционного порядка.

3. Исследование реализованного микрорельефа методами численного и оптического экспериментов

Для возбуждения волоконного световода с нанесенным на торец рельефом бинарной дифракционной решетки излучение CO_2 лазера ИЛГН-708 мощностью 30 Вт фокусировалось на неструктурированный торец световода линзой, изготовленной из селенида цинка.

Согласование многомодового пучка лазера диаметром около 6 мм с сердечником световода диаметром около 1 мм достигается при фокусном расстоянии линзы порядка $f=250$ мм. Очевидно, что для разделения изображений дифракционных порядков на выходе световода необходимо, чтобы угол дифракции θ первого порядка дифракционной решетки на торце световода превышал числовую апертуру световода.

Для $\lambda=10,6$ мкм и периода решетки 30 мкм угол θ будет около 0,35 рад., а величина числовой апертуры световода менее 0,2, то есть частота решетки вполне достаточна для проведения эксперимента. Регистрация выходного излучения световода осуществлялась на термобумаге с минимальной температурой потемнения около 100°C . Для обеспечения такой температуры на расстоянии 5–10 мм от торца световода оказалось достаточно около 2 Вт мощности лазерного излучения.

Для ослабления лазерного пучка на выходе из лазера использовался вращающийся диск с секторным вырезом. Угол сектора плавно регулировался дополнительной пластиной для достижения необходимого уровня ослабления.

Схема оптической установки приведена на рис. 8.

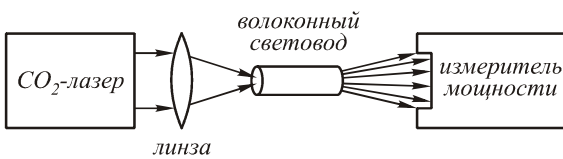


Рис. 8. Схема оптической установки

Полученные на термобумаге изображения выходного пучка световода на расстоянии около 6 мм от торца приведены на рис. 9.

Видно наличие трех пятен, соответствующих нулевому и плюс-минус первым порядкам дифракции.

Для измерения энергии в дифракционных порядках использовался измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н с апертурой около 12 мм. Вначале приемная апертура располагалась в непосредственной близости от выходного торца световода, при этом показание составило 0,032 Вт. Затем головка прибора отодвигалась от торца световода до момента скачкообразного изме-

нения мощности, которое свидетельствовало о выходе высших порядков дифракции из входной апертуры головки. При этом мощность падала до 0,015 Вт, то есть примерно вдвое.

Следовательно, на нулевой порядок приходится около 50% мощности.

На рис. 10 приведены результаты численного моделирования работы решетки с реализованным микрорельефом (отношение ширины канавки решетки к периоду в вычислительном эксперименте полагалось 0,3, период решетки выбирался 30 мкм). Моделирование проведено с помощью программного обеспечения по компьютерной оптике “Quick-DOE” [9] (в качестве освещающего пучка рассматривалась плоская волна с равномерным поперечным распределением интенсивности) в рамках скалярной теории дифракции с помощью Быстрого Преобразования Фурье (БПФ).

По результатам моделирования в рамках скалярной теории дифракции доля энергии, приходящейся на нулевой порядок дифракции, составила 11%, что значительно меньше экспериментально полученного значения.

С учетом того, что характерный размер идеального микрорельефа близок к значению длины волны для более точного количественного анализа дифракции на решетке было решено использовать строгую электромагнитную теорию.

Моделирование работы изучаемой решетки в рамках строгой электромагнитной теории с целью верификации результатов проводилось двумя методами: разностным решением уравнений Максвелла [10] и с помощью “дифференциального” подхода [11].

Первый метод связан с составлением явной разностной схемы для уравнений Максвелла и наложением сеточной области на исследуемую решетку.

Выбирая стандартные параметры дискретизации области [10], авторы получили следующие значения интенсивностей прошедших порядков (в процентах к энергии освещающего пучка), характеризующих работу решетки: для нулевого порядка $I_0=18,48\%$ и $I_1=I_{-1}=20,37\%$; $I_2=I_{-2}=8,221\%$ для первого, минус первого, второго и минус второго порядков соответственно. Полученные результаты были найдены в предположении, что на решетку падает T – волна, после решетки формируется H – волна [12].

Второй метод основан на согласовании поля вне решетки (там поле представлено в виде разложения Релея) с полем внутри, заданном непосредственно уравнением Гельмгольца. При этом в разложении Релея авторы ограничивались 15-ю коэффициентами ряда [10].

Для решетки с выбранными параметрами интенсивности прошедших порядков составили: $I_0=18,5\%$; $I_1=I_{-1}=21,19\%$; $I_2=I_{-2}=10,22\%$.

Хорошее согласование величин, полученных разными методами, подтверждает адекватность используемых моделей [10],[11] и правильность полученных результатов.

Таким образом, использование скалярной теории в случае моделирования решетки с характерным

размером, близким к длине волны, и высокой оптической плотностью подложки приводит к существенным погрешностям.

Однако количественные результаты натурального эксперимента также находятся в несоответствии с результатами моделирования дифракционной решетки в рамках строгой теории.

Расхождения в результатах моделирования и натурального эксперимента могут быть объяснены наличием локальных погрешностей формирования рельефа, что видно, например, на рис.5.

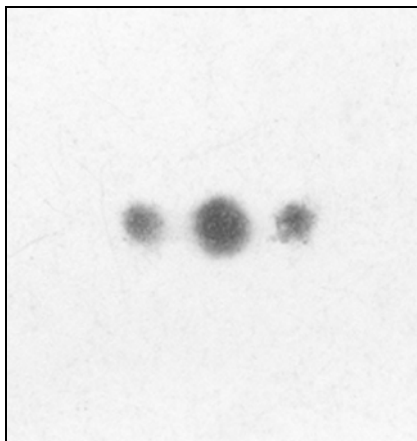


Рис. 9. Результат взаимодействия волноводного излучения с термобумагой

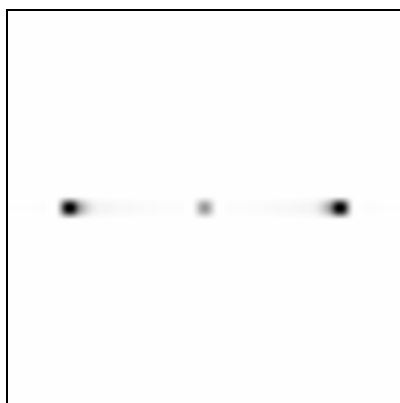


Рис. 10. Расчетная интенсивность на выходе волокна с нанесенным на торец дифракционным рельефом

Заключение

Анализ результатов экспериментов показал, что применение технологии горячей штамповки позволяет формировать микрорельеф на торце галогенидного волновода с приемлемым качеством. В данной статье приведены лишь первые результаты экспериментов по использованию данной технологии к формированию микрорельефа на торце ИК волновода.

В дальнейшем авторы намерены развить данный подход, в частности, для случаев:

- реализации многоуровневого микрорельефа;

- реализации двумерного рельефа, что потребует решения задачи совмещения матрицы с оптической осью волновода;

- реализации субволнового микрорельефа (в частности, для снижения потерь на френелевское отражение при возбуждении волокна) и т.д.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ-1007.2003.1, а также российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» («BRHE») и грантов РФФИ 04-02-08094 и 05-01-96505. Авторы выражают также благодарность А.А. Кондорову за помощь в создании установки для штамповки рельефа, а также Я.Е. Тахтарову и В.В. Кононенко за помощь в подготовке и обработке материалов для данной статьи.

Литература

1. Karpeyev S.V., Pavelyev V.S., Duparre M. et al. DOE-aided Analysis and Generation of Transverse Coherent Light Modes in a Stepped-Index Optical Fiber // *Optical Memory And Neural Networks (Information Optics)*. 2003. Vol. 12, No.1, pp. 27-34.
2. *Методы компьютерной оптики* под редакцией В.А. Сойфера / глава 6, с. 395-470. – Павельев В.С., Сойфер В.А. // М.: «Физматлит», 2000, 688 с.
3. *Методы компьютерной оптики* под редакцией Сойфера В.А. / глава 1, с. 11-48. – Сойфер В.А. // М.: «Физматлит», 2000, 688 с.
4. Prasciolu M., Cojoc D., Cabrini S., Businaro L., Candeloro P., Tormen M., Kumar R., Liberale C., Degiorgio V., Gerardino A., Gigli G., Pisignano D., Di Fabrizio E., Cingolani R. Design and fabrication of on-fiber diffractive elements for fiber-waveguide coupling by means of e-beam lithography// *Microelectronic Engineering* V. 67-68, June 2003, pp. 169-174 .
5. Johnson E.G., Stack J., Suleski T.J., Koehler C., Delaney W. Fabrication of micro optics on coreless fiber segments, *Applied Optics*, V. 42, N 5, 2003.
6. Введение в фотолитографию // Под ред. Лаврищева В. П. - М.: Энергия, 1977. 400 с.
7. Моро У. Микролитография. В 2-х частях. Пер. с англ. (М.: Мир, 1980).
8. Recknagel R.J., Notni G., Analysis of white light interferograms using wavelet methods. // *Optics Communications*, 1998. 148, P. 122-128,
9. Doskolovich L.L., Golub M.A., Kazanskiy N.L., Khramov A.G., Pavelyev V.S., Seraphimovich P.G., Soifer V.A., Volotovskiy S.G. Software on diffractive optics and computer-generated holograms // *Proc. SPIE*, 1995. Vol. 2363. - P.278-284.
10. Головашкин Д.Л. Дифракции Н-волны на двумерной диэлектрической решетке // *Математическое моделирование*, 2004. Т. 16, N 9, с. 53-61.
11. *Electromagnetic Theory on Gratings/* Ed. by R. Petit. Berlin; Heidelberg: New York; Springer-Verlag, 1980
12. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн // Учеб. пособие для вузов.- 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 544 с.