

03

## Спектральная и угловая зависимости эффективности трехслойных рельефно-фазовых дифракционных элементов ИК диапазона

© Г.И. Грейсх<sup>1</sup>, В.А. Данилов<sup>2</sup>, С.А. Степанов<sup>1</sup>, А.И. Антонов<sup>1</sup>, Б.А. Усиевич<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028 Пенза, Россия

<sup>2</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 117342 Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

e-mail: grey@pguas.ru

Поступила в редакцию 27.02.2018 г.

В рамках скалярной и строгой теории дифракции, основанной на решении системы уравнений Максвелла, проведено исследование пилообразных рельефно-фазовых трехслойных микроструктур, рассчитанных на работу с полихроматическим излучением среднего ИК диапазона ( $3 \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$ ). Расширен ряд эффективных микроструктур, скомпонованных из различных оптических материалов, и минимизированы глубины их рельефов. Ряд расширен, в частности, за счет микроструктур, у которых френелевские потери на отражение от обоих рельефов не превышают 10%. Этот фактор в совокупности с относительно небольшой суммарной глубиной рельефов может оказаться определяющим при выборе той или иной микроструктуры для решения конкретной научной или технической задачи.

DOI: 10.21883/OS.2018.07.46267.57-18

### Введение

Снижение дифракционной эффективности (ДЭ) дифракционных оптических элементов (ДОЭ) при изменении длины волны и угла падения излучения на элемент является одним из наиболее серьезных факторов, сдерживающих использование таких элементов в изображающих, фокусирующих и др. оптических системах.

Спектральная и угловая зависимости эффективности трехслойных рельефно-фазовых дифракционных оптических элементов, рассчитанных на видимое излучение, достаточно хорошо изучены. Так, в работах [1–5] в рамках скалярной теории дифракции (СТД) получены выражения для ДЭ трехслойных пилообразных рельефно-фазовых микроструктур, предложены методы выбора оптических материалов и компоновки таких микроструктур, а также получения оптимальных глубин пилообразных микрорельефов (рис. 1).

Показано, что при соответствующем выборе трех оптических материалов и приемлемых (с практической точки зрения) оптимальных глубинах рельефов в пределах видимого спектрального диапазона ( $0.4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.7 \mu\text{m}$ ) и в интервале углов падения излучения из воздуха на микроструктуру ( $-30^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ ) минимальная ДЭ в первом рабочем порядке, полученная в рамках СТД,  $\eta_{S,\min} \geq 0.95$ . Более того, если допустить, чтобы суммарная глубина рельефов  $h_{\Sigma} = h_1 + h_2$  не превышала  $37 \mu\text{m}$ , то, как показано в [5], можно подобрать комбинацию оптических материалов, обеспечивающих  $\eta_{S,\min} \geq 0.95$  в интервале углов падения излучения из

воздуха на микроструктуру  $-70^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ . К сожалению, полученные в рамках СТД и приведенные выше интервалы углов падения излучения существенно превышают реально достижимые, которые прогнозируются строгой теорией дифракции, основанной на решении системы уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями. Действительно, отношение допустимых углов падения излучения, прогнозируемых СТД —  $\theta$  и строгой теорией дифракции —  $\Psi$ , лежит в диапазоне  $1.3 \leq \theta/\Psi \leq 1.7$  [5].

Интерес к использованию ДОЭ в приборах ИК диапазона обусловил исследования, направленные на созда-

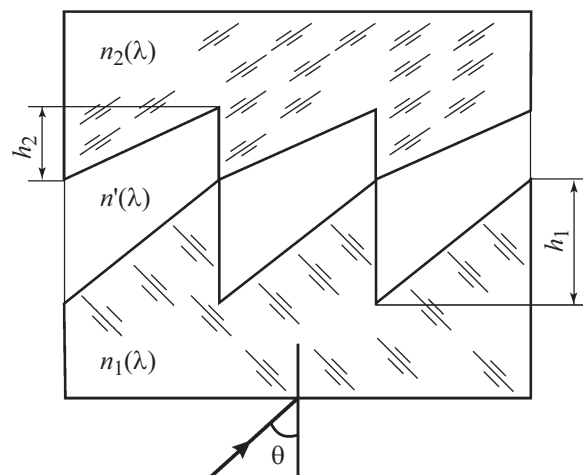


Рис. 1. Трехслойная пилообразная рельефно-фазовая микроструктура.

ние высокоэффективных дифракционных микроструктур этого диапазона. Так, в работе [6] предложены и в рамках СТД исследованы трехслойные рельефно-фазовые микроструктуры, рассчитанные на полихроматическое излучение среднего ИК диапазона ( $3 \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$ ). Эти микроструктуры komponуются из обычно используемых в этом диапазоне оптических материалов, таких как  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Ge,  $\text{MgF}_2$ , Si,  $\text{SiO}_2$ , ZnS. ДЭ микроструктур  $\eta_S$  в зависимости от длины волны  $\lambda$  и угла падения излучения  $\theta$  оценивается по формулам, предложенным в работе [1]. При этом глубины рельефов  $h_1$  и  $h_2$  получают путем решения системы двух уравнений, обеспечивающих  $\eta_S = 1$  на двух выбранных длинах волн заданного спектрального диапазона при нормальном падении излучения ( $\theta = 0$ ). Показано, что у некоторых микроструктур  $\eta_{S,\text{min}}$  больше 0.9 или даже 0.95 при углах падения излучения свыше  $65^\circ$ .

Очевидно, что используемый авторами работы [6] подход к получению глубин рельефов трудно назвать оптимальным, а главное, есть основания сомневаться в том, что полученные в рамках СТД предельно допустимые углы падения излучения соответствуют реально достижимым. Действительно, если явное несоответствие этих углов наблюдается в видимом диапазоне, то в ИК диапазоне соответствие углов (или степень их несоответствия) требует, как минимум, оценки. Более того, только в рамках строгой теории дифракции можно оценить и сопоставить потенциальные возможности каждой из предложенных в [6] трехслойных микроструктур, а следовательно, и прогнозировать перспективы их практического использования.

## Используемые методы исследования и критерии

Для вычисления ДЭ трехслойных микроструктур в рамках СТД за основу также взяты соответствующие формулы работы [1], но с целью объективного сопоставления микроструктур, сконструированных из различных материалов, в них угол падения излучения в оптическом материале заменен на угол падения излучения из воздуха в материал с показателем преломления  $n_1(\lambda)$  (рис. 1). В результате формулы приобрели вид

$$\eta_S = \left[ \frac{\sin(\pi(m - \chi))}{\pi(m - \chi)} \right]^2,$$

где

$$\chi = \left( \frac{1}{\lambda} \right) \left[ h_1 \left( \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} \right) + h_2 \left( \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta} - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \right) \right],$$

$m$  — номер порядка дифракции.

Оптимальные значения глубин рельефов  $h_1$  и  $h_2$  для выбранной тройки оптических материалов зависят от

выбора критерия оптимальности. Если предполагается использовать ДЭ в спектральном приборе или изображающей оптической системе и дифракция излучения в побочные порядки нежелательна на любой длине волны рабочего спектрального диапазона, то наиболее адекватным является критерий, предложенный в работе [7]. В соответствии с ним за оптимальные значения глубин  $h_1$  и  $h_2$  принимаются значения, обеспечивающие в выбранном спектральном диапазоне максимально возможный интервал углов падения излучения, в пределах которого ДЭ (в точке ее минимума) не опускалась ниже заданного уровня.

Для оценки ДЭ трехслойной микроструктуры в рамках строгой теории дифракции, основанной на решении системы уравнений Максвелла, используется строгий метод связанных волн (Rigorous coupled-wave analysis (RCWA)) [8]. В соответствии с ним пилообразные рельефы дифракционной микроструктуры заменяются ступенчатыми, и каждая ступень ограничивает тонкий слой, образующий бинарную диэлектрическую решетку, к которой применяется разложение в ряд Фурье. Наши исследования, выполненные RCWA-методом с использованием компьютерной программы, представленной в [9], показали, что в случае трехслойной микроструктуры хорошая сходимость результатов расчета, а следовательно, и их высокая достоверность достигаются при высоте ступеней порядка  $(0.15 - 0.2)\lambda_{\text{min}}$  и числе гармоник ряда Фурье больше 300. Здесь  $\lambda_{\text{min}}$  — минимальная длина волны рабочего спектрального диапазона.

Для сопоставления углов падения излучения на микроструктуру, приводящих к снижению ДЭ до одного и того же уровня, но полученных двумя различными методами, эти углы обозначены разными буквами:  $\theta$  — в рамках СТД и  $\Psi$  — RCWA-методом. Это вызвано тем, что в силу асимметрии рельефа модуль отрицательного угла падения  $|\Psi_N|$  и положительный угол падения излучения  $\Psi_P$ , приводящие к снижению ДЭ, оцениваемого RCWA-методом, до одного и того же уровня, могут существенно отличаться, и за оценочный угол  $\Psi$ , как и в работах [5,7], в настоящей работе принят наименьший из углов  $|\Psi_N|$  и  $\Psi_P$  падения излучения из воздуха на ДЭ, приводящий к снижению ДЭ до заданного уровня.

Завершая раздел, заметим, что при расчете ДЭ RCWA-методом (в отличие от расчета в рамках СТД) учитываются френелевские потери, обусловленные отражением излучения от обоих рельефов, т.е. оценивается фактическая эффективность микроструктуры, обозначенная ниже как  $\eta_{EM}$ . В то же время, чтобы обеспечить корректность сравнения ДЭ, полученных разными методами, френелевские потери исключаются путем нормирования значений ДЭ, полученных RCWA-методом, на максимальное значение ДЭ в пределах выбранного спектрального диапазона, но полученное при нормальном падении излучения на ДЭ ( $\Psi = 0$ ). Нормированная ДЭ обозначена как  $\eta_{EM}^{(N)}$ . Все расчеты, как и в работе [6], выполнялись в среднем ИК диапазоне ( $3 \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$ ).

Конструктивные параметры, дифракционная эффективность и френелевские потери трехслойных микроструктур

| № | Оптические материалы                                                   | Источник | $h_1, \mu\text{m}$ | $h_2, \mu\text{m}$ | $\theta_{\text{max}}, \text{grad}$ | $\eta_{S, \text{min}}$ | $\eta_{EM, \text{min}}$            | $\eta_{EM, \text{min}}^{(N)}$ | Френелевские потери, % |
|---|------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 1 | MgF <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> /Si [6]                             | [НС]     | -23.1              | 2.10               | 80                                 | 0.94                   | 0.71                               | 0.87                          | 17.9                   |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 30^\circ$ |                               |                        |
|   |                                                                        | [6]      | -27.84             | 2.46               | 25                                 | 0.94                   | 0.61                               | 0.75                          |                        |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 30^\circ$ |                               |                        |
| 2 | SiO <sub>2</sub> /ZnS/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [6]               | [НС]     | -13                | -26.20             | 65                                 | 0.95                   | 0.74                               | 0.82                          | 7.7                    |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 30^\circ$ |                               |                        |
|   |                                                                        | [6]      | -31.06             | -53.47             | 25                                 | 0.47                   | 0.32                               | 0.35                          |                        |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 20^\circ$ |                               |                        |
| 3 | MgF <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [6] | [НС]     | -31.77             | 16.56              | 40                                 | 0.81                   | 0.75                               | 0.76                          | 0.8                    |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 20^\circ$ |                               |                        |
|   |                                                                        | [6]      | -31.97             | 18.06              | 40                                 | 0.53                   | 0.52                               | 0.53                          |                        |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 20^\circ$ |                               |                        |
| 4 | ZnS/Si/Ge [6]                                                          | [НС]     | -18.36             | 29.74              | 30                                 | 0.81                   | 0.38                               | 0.40                          | 4.9                    |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 20^\circ$ |                               |                        |
| 5 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZnS/MgF <sub>2</sub>                   | [НС]     | -14.15             | -5.08              | 80                                 | 0.91                   | 0.71                               | 0.80                          | 8.3                    |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 30^\circ$ |                               |                        |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | 0.75                               | 0.84                          |                        |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 20^\circ$ |                               |                        |
| 6 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgF <sub>2</sub> /AMTIR3               | [НС]     | -13.96             | -6.66              | 80                                 | 0.97                   | 0.68                               | 0.79                          | 11.1                   |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 30^\circ$ |                               |                        |
| 7 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZnS/AMTIR3                             | [НС]     | -11.44             | 7.42               | 40                                 | 0.93                   | 0.68                               | 0.72                          | 2.8                    |
|   |                                                                        |          |                    |                    |                                    |                        | при $\Psi_{\text{max}} = 30^\circ$ |                               |                        |

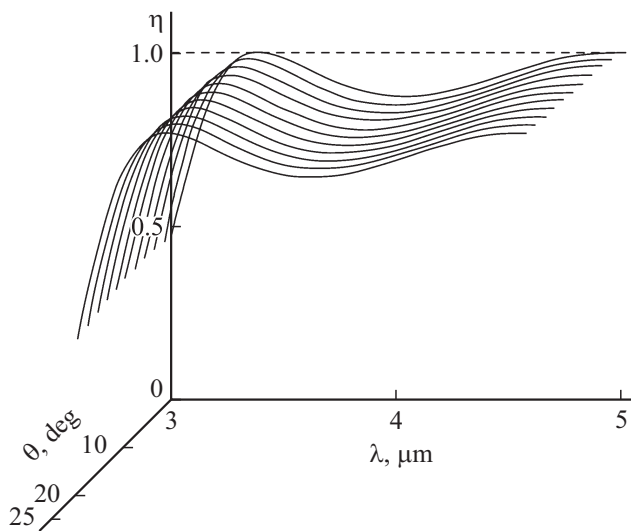
## Результаты исследований

Основные результаты наших исследований трехслойных микроструктур, как в рамках СТД, так и RCWA-методом, сведены в таблицу. В ней в столбце „Оптические материалы“ для заимствованных конфигураций указана работа [6], в которой данная конфигурация предложена впервые. В столбце „Источник“ указаны либо работа [6], либо настоящая работа [НС], в которых получены представленные в соответствующих столбцах глубины рельефов  $h_1$  и  $h_2$ . Знак глубин, как и в работе [6], обеспечивает максимальную ДЭ в первом порядке дифракции ( $m = 1$ ).

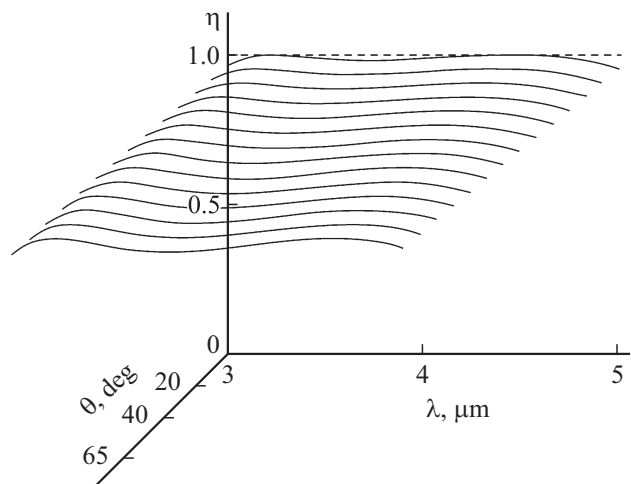
В столбце  $\theta_{\text{max}}$  указан интервал углов ( $-\theta_{\text{max}} \leq \theta \leq \theta_{\text{max}}$ ), в пределах которых ДЭ, рассчитанная в рамках СТД, в выбранном спектральном диапазоне не опускается ниже величины, приведенной в столбце  $\eta_{S, \text{min}}$ . В столбцах  $\eta_{EM, \text{min}}$  и  $\eta_{EM, \text{min}}^{(N)}$  приведены значения, полученные RCWA-методом, ниже которых ДЭ не опускается в выбранном спектральном диапазоне и в интервале

углов  $-\Psi_{\text{max}} \leq \Psi \leq \Psi_{\text{max}}$ . Эти значения ДЭ получены для микроструктуры с пространственным периодом, десятикратно превышающим суммарную глубину пилообразных рельефов,  $\Lambda = 10(|h_1| + |h_2|)$  [7].

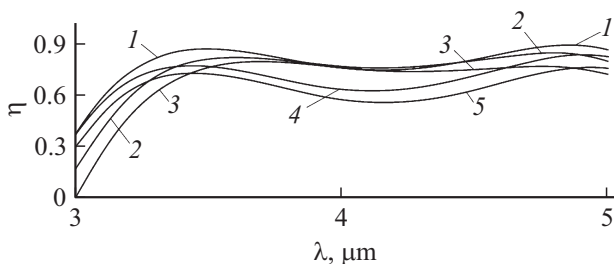
Как следует из таблицы, переход при определении оптимальных глубин рельефов от решения системы двух уравнений к использованию критерия, предложенного в работе [7], дает несомненный выигрыш, наблюдаемый по результатам расчетов как в рамках СТД, так и RCWA-методом. Но главное, что использование критерия, предложенного в работе [7], позволило раскрыть потенциальные возможности конфигураций, описанных в работе [6], и минимизировать глубины их рельефов. Кроме того, это позволило предложить новые эффективные конфигурации, komponуя их из материалов, использованных в работе [6], и материала AMTIR3 из каталога „INFRARED“ программы оптического проектирования ZEMAX. Сопоставляя результаты расчетов, выполненных RCWA-методом и представленных в столбцах  $\eta_{EM, \text{min}}^{(N)}$  и  $\eta_{EM, \text{min}}$ , нетрудно видеть, что наилучшей



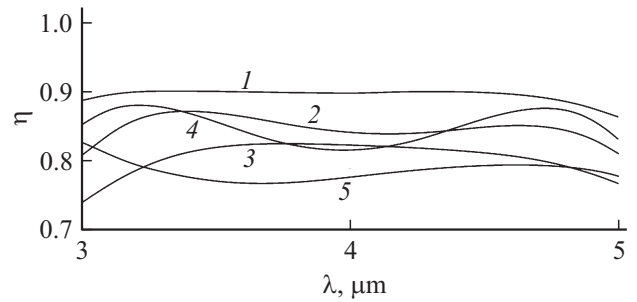
**Рис. 2.** Зависимость ДЭ, полученная в рамках СТД, от длины волны и угла падения излучения на микроструктуру в конфигурации № 2 ( $\text{SiO}_2/\text{ZnS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) при глубинах рельефов  $h_1 = -31.06 \mu\text{m}$  и  $h_2 = -53.47 \mu\text{m}$ .



**Рис. 3.** Зависимость ДЭ, полученная в рамках СТД, от длины волны и угла падения излучения на микроструктуру в конфигурации № 2 ( $\text{SiO}_2/\text{ZnS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) при глубинах рельефов  $h_1 = -13 \mu\text{m}$  и  $h_2 = -26.20 \mu\text{m}$ .



**Рис. 4.** Зависимости ДЭ от длины волны, полученные RCWA-методом, для микроструктуры в конфигурации № 2 ( $\text{SiO}_2/\text{ZnS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) при глубинах рельефов  $h_1 = -31.06 \mu\text{m}$  и  $h_2 = -53.47 \mu\text{m}$ .  $\Psi = 0^\circ$  (1);  $-20^\circ$  (2);  $-30^\circ$  (3);  $20^\circ$  (4);  $30^\circ$  (5).



**Рис. 5.** Зависимости ДЭ от длины волны, полученные RCWA-методом, для микроструктуры в конфигурации № 2 ( $\text{SiO}_2/\text{ZnS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) при глубинах рельефов  $h_1 = -13 \mu\text{m}$  и  $h_2 = -26.20 \mu\text{m}$ .  $\Psi = 0^\circ$  (1);  $-20^\circ$  (2);  $-30^\circ$  (3);  $20^\circ$  (4);  $30^\circ$  (5).

конфигурацией как с точки зрения нормированной ДЭ, не учитывающей френелевские потери, так и с точки зрения фактической ДЭ является конфигурация № 2 ( $\text{SiO}_2/\text{ZnS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) при глубинах рельефов  $h_1 = -13 \mu\text{m}$  и  $h_2 = -26.20 \mu\text{m}$ . На рис. 2–5 для этой конфигурации приведен ряд графиков, более наглядно иллюстрирующих выигрыш, достигнутый благодаря оптимизации глубин обоих рельефов микроструктуры.

Что касается конфигураций № 5–7, то они по параметрам  $\eta_{EM,\min}^{(N)}$  и  $\eta_{S,\min}$  несколько уступают конфигурации № 2, но зато отличаются значительно меньшими глубинами рельефов. Это может играть определяющую роль с точки зрения технологии изготовления микроструктур.

## Заключение

В настоящей работе в рамках скалярной и строгой теории дифракции (RCWA-методом) проведено исследование пилообразных рельефно-фазовых трехслойных микроструктур, рассчитанных на работу с полихроматическим излучением среднего ИК диапазона ( $3 \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$ ). При этом в качестве критерия оценки эффективности микроструктуры использовался критерий, предложенный в работе [7] и требующий, чтобы во всем рабочем спектральном диапазоне обеспечивался максимально возможный интервал углов падения излучения, в пределах которого ДЭ (в точке ее минимума) не опускается ниже заданного уровня.

Данный критерий позволил не только оптимизировать глубины рельефов микроструктур в уже известных конфигурациях, но и организовать в рамках СТД из предложенного каталога оптических материалов автоматический процесс компоновки новых конфигураций, обеспечивающих выполнение заданных требований при минимально возможной суммарной глубине рельефов.

Были сопоставлены значения ДЭ, прогнозируемые СТД и RCWA-методом, и в результате были раскрыты потенциальные возможности конфигураций, описанных

в работе [6], и минимизированы глубины их рельефов. Кроме того, были предложены новые эффективные конфигурации, скомпонованные из материалов, использованных в работе [6], и материала AMTIR3 из каталога „INFRARED“ программы оптического проектирования ZEMAX. При этом новые конфигурации дополнили ряд тех, у которых френелевские потери на отражение от обоих рельефов не превышают 10%. Этот фактор в совокупности с относительно небольшой суммарной глубиной рельефов может оказаться определяющим при выборе трехслойной микроструктуры в той или иной конфигурации для решения конкретной научной или технической задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01461).

## Список литературы

- [1] *Zhao Y.H., Fan C.J., Ying C.F., Liu S.H.* // Opt. Commun. 2013. V. 295. P. 104.
- [2] *Shan Mao, Qingfeng Cui, Mingxu Piao, Lidong Zhao* // Appl. Optics. 2016. V. 55. N 13. P. 3549–3554.
- [3] *Ya-hui Zhao, Chang-jiang Fan, Chao-fu Ying, Hui Wang* // Optik. 2013. V. 124. N 20. P. 4142–4144.
- [4] *Fan Changjiang* // Proc. SPIE. V. 9272. N 92720. P. 1–6.
- [5] *Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А.* // Опт. и спектр. 2015. Т. 118. № 6. С. 118.
- [6] *Hongbo Xie, Delun Ren, Chao Wang, Chen-sheng Mao & Lei Yang* // J. Mod. Optics. 2018. V. 65. N 3. P. 255–261.
- [7] *Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А.* // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 5. С. 56.
- [8] *Moharam M.G., Gaylord T.K.* // J. Opt. Soc. Am. 1982. V. 72. N 10. P. 1385.
- [9] *Lyndin N.M.* Modal and C Methods Grating Design and Analysis Software. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.mcgrating.com>