

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАНООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Казанский Н.Л.^{1,2}, Серафимович П.Г.², Попов С.Б.^{1,2}, Хонина С.Н.^{1,2}

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва,

² Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

Рассмотрена оптимизация нанооптического пропускающего спектрального фильтра. Структура рассчитанного устройства учитывает особенности последующего изготовления данного фильтра методом наноимпринтинга. Оптимизация фильтра выполнена на вычислительном кластере с использованием параллельного асинхронного стохастического метода. Приведен анализ погрешностей изготовления рассчитанной наноструктуры, которые характерны для метода наноимпринтинга.

Ключевые слова: нанооптика, спектральный фильтр, наноимпринтинг, стохастические методы оптимизации, параллельные вычисления, асинхронный алгоритм.

Введение

Совершенствование технологий изготовления наноструктур открывает новые возможности при создании современных оптических устройств. Наноимпринтинг (nanoimprinting lithography или hot embossing lithography) является перспективным методом недорогого массового производства наноструктур [1]. Этот метод позволяет изготавливать одномерные и двумерные многослойные структуры.

Спектральные фильтры как отражающие, так и пропускающие, применяются во многих оптических устройствах. Традиционным способом изготовления таких фильтров является нанесение десятков, а иногда и сотен тонкопленочных слоев различных материалов. Путем интерференционного сложения и вычитания интенсивности света при переотражении на границах слоев достигаются требуемые характеристики спектрального фильтра. Использование волноводного резонанса позволяет на порядки уменьшить количество наносимых слоев и таким образом удешевить процесс изготовления фильтра и уменьшить его толщину.

Следует отметить несколько опубликованных работ, посвященных расчету спектральных фильтров. Например, в работе [2] получен пропускающий спектральный фильтр с эффективностью 40%. Статья [3] описывает расчет отражающего спектрального фильтра. В работе [4] описаны пропускающие спектральные фильтры с эффективностью 60-80%. В статье [5] для создания пропускающего фильтра использована металлическая дифракционная решетка. Однако полученные в вышеперечисленных работах наноструктуры не предназначены для их последующего изготовления методом наноимпринтинга. Кроме того, в указанных работах нет описания метода, который использовался для оптимизации структуры спектрального фильтра.

Далее будут рассмотрены структуры, обеспечивающие возникновение волноводного резонанса, используемые методы расчета электромагнитного поля в таких структурах, а также параллельные асинхронные стохастические методы оптимизации подобных структур на вычислительном кластере.

Постановка задачи

В данной работе рассмотрена оптимизация нанофотонных структур на примере многослойного пропускающего спектрального фильтра. Принцип работы этого оптического устройства базируется на волноводном резонансе (guided-mode resonance – GMR) [6]. В отличие от плазмонного резонанса для возбуждения GMR не требуется использование металла.

На рис. 1а представлен пример простой структуры, в которой возможно возникновение волноводного резонанса. Пусть диэлектрическая проницаемость волновода описывается следующей функцией

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_g + \Delta\varepsilon \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right), \quad (1)$$

где Λ – период модуляции диэлектрической проницаемости волновода.

Согласно теории связанных волн, распространение света в таком однослойном волноводе описывается следующим уравнением

$$\frac{d^2 E_i(z)}{dz^2} = \left[k^2 \varepsilon_g - k^2 \left(\sqrt{\varepsilon_g} \sin \theta - \frac{i\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right] \times \\ \times E_i(z) + \frac{1}{2} k^2 \Delta\varepsilon [E_{i-1}(z) + E_{i+1}(z)] = 0 \quad (2)$$

где λ – длина волны падающего света, E_i – амплитуда плоской волны, соответствующей i -му порядку, z – координата, перпендикулярная направлению волновода, k – волновое число, θ – угол падения света. В случае отсутствия модуляции диэлектрической проницаемости волновода ($\Delta\varepsilon = 0$) приведенное уравнение переходит в волновое уравнение для диэлектрического волновода.

На рис. 1а схематически показаны также пути нулевых прошедшего и отраженного дифракционных порядков.

На рис. 1б показана еще одна простая схема однослойного волноводного резонатора, в котором дифракционная решетка служит одновременно и волноводом, и средством ввода падающего света в этот волновод. В общем случае две эти функции могут

выполняться двумя различными слоями структуры. Рассмотрим случай нормального падения света на структуру, при котором для отражения и пропускания используются только нулевые дифракционные порядки. Тогда для возникновения волноводного резонанса должно выполняться следующее условие:

$$\frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} < \Lambda < \lambda, \quad (3)$$

где ϵ_{eff} – усредненная диэлектрическая проницаемость, рассчитанная в соответствии с теорией эффективной среды. Выражение (3) позволяет приблизительно оценить значение периода дифракционной решетки.

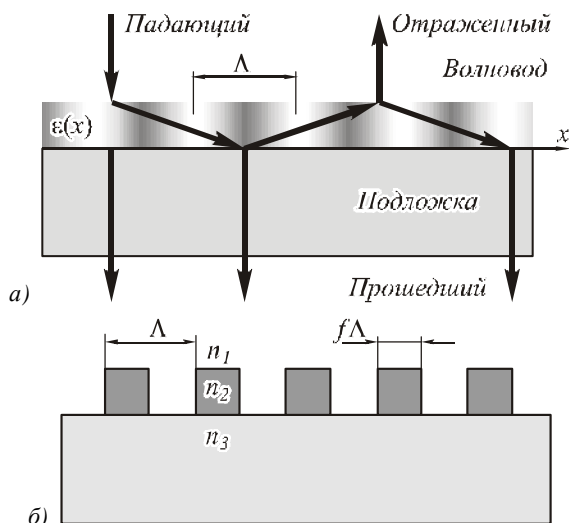


Рис. 1. Схема работы волноводного спектрального фильтра

Согласно теории эффективной среды можно аппроксимировать усредненную диэлектрическую проницаемость волновода на рис. 1б следующими функциями:

$$\epsilon_{eff}^{TE} = (1-f)n_1^2 + fn_2^2 \quad (4)$$

для ТЕ-поляризации, и

$$\epsilon_{eff}^{TM} = \frac{(n_1 n_2)^2}{(1-f)n_2^2 + f n_1^2} \quad (5)$$

для ТМ-поляризации. Здесь f – коэффициент заполнения периода решетки.

Для точного анализа наноструктур, которые обеспечивают возникновение волноводного резонанса, требуется использовать векторные методы расчета дифракции электромагнитного поля. Для этого в данной работе использован RCWA (Rigorous Coupled-Wave Analysis) алгоритм [7-11], основанный на методе Фурье-мод.

Оптимизация структуры спектрального фильтра

Геометрические параметры волновода и решетки, а также свойства материалов используются для оптимизации рассчитываемого спектрального фильтра. Создаваемый спектральный фильтр может

быть отражающим или пропускающим, а также одно- или многополосным. Рассмотрим процесс проектирования однополосного пропускающего спектрального фильтра. За основу оптимизируемого фильтра взята структура, изображенная на рис. 2. Несколько параметров этой структуры зафиксированы. Прежде всего, это характеристики материалов. Чтобы расширить список пригодных для использования материалов, величина n_2 выбрана относительно малой ($n_2 = 2$). Оставшиеся материалы – это воздух ($n_1 = 1$) и стандартный пластик ($n_3 = 1,5$). Коэффициент заполнения периода решетки f полагается равным 1/2.

Толщина 1-го и 3-го слоев считается одинаковой (d), т.к. полагается, что для изготовления будет использован метод нанопринтинга. Таким образом, оптимизируются пять оставшихся параметров: Λ, d, t, w, v .

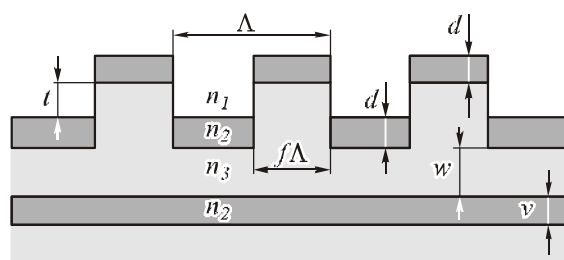


Рис. 2. Оптимизируемая структура и параметры фильтра

Электромагнитное моделирование прохождения света через многослойную структуру, включающую элементы рельефа с размером порядка длины волны падающего света, является ресурсоемкой задачей [12]. Тем более ресурсоемкой является оптимизация подобных наноструктур. Учитывая, что методом оптимизации, как правило, является стохастический метод поиска глобального экстремума, решение данной задачи с помощью высокопроизводительных вычислительных средств – суперкомпьютера или кластера – становится оправданным [13, 14].

В качестве метода оптимизации выбрана асинхронная параллельная реализация метода PSO (Particle Swarm Optimization) [15, 16]. На рис. 3 показан псевдокод асинхронного последовательного алгоритма PSO. Семантика данного алгоритма базируется на аналогии с пчелиным роем, который занят поисками наиболее медоносной области.

- **Инициализация начальных данных**
 - Задать входные параметры
 - Случайным образом инициализировать точки решений и их скорости
- **Оптимизация**
 - Цикл по количеству итераций, индекс k
 - Цикл по количеству точек решений, индекс i
 - Рассчитать функцию критерия $f(x_i^k)$
 - Проверить условие схождения алгоритма
 - Обновить значения точек решений и их скоростей
- **Вывод результатов**

Рис. 3. Псевдокод асинхронного последовательного алгоритма PSO

В качестве функции критерия выбрано отклонение рассчитанного значения прошедшего 0-го дифракционного порядка от заданного для требуемого спектрального диапазона

$$f = \left(\frac{1}{M} \sum_{\lambda} [T_{desired}(\lambda) - T_{design}(\lambda)]^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

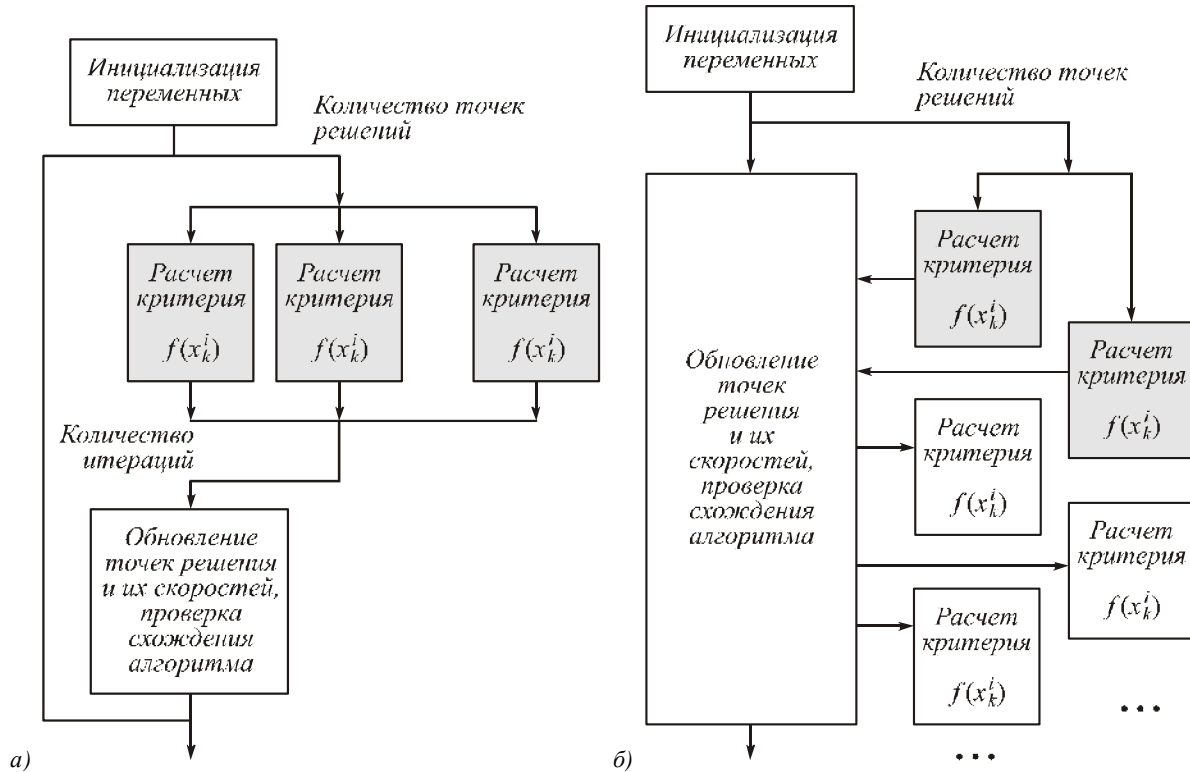


Рис. 4. Блок-схемы параллельного синхронного алгоритма PSO (а) и параллельного асинхронного алгоритма PSO (б)

Качество рассчитанного спектрального фильтра будем оценивать по следующим параметрам: эффективность и контраст. Эффективностью фильтра E будем считать количество энергии, пропущенное фильтром в 0-м порядке на центральной длине волны расчетного спектрального диапазона. Контраст фильтра будем рассчитывать по формуле

$$K = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}, \quad (7)$$

где E_{max} – значение максимума спектрального фильтра, а E_{min} – максимальное значение по другую сторону от E_{max} по отношению к одному из двух локальных минимумов (рис. 5).

Спектральный фильтр в данной работе рассчитывался для ТЕ-поляризованного падающего света. Количество точек решений при оптимизации данной структуры выбрано равным 20. Функция критерия строилась по 9 отсчетам в спектральном диапазоне от 540 нм до 560 нм с шагом 2,5 нм. В результате оптимизации получены следующие значения параметров (нм): $\Lambda = 431,92$, $d = 356$, $t = 340,56$, $w = 436,48$, $\nu = 313,8$. Для получения решения выполнено ~200 тыс. расчетов функции критерия.

где M – количество отсчетов спектрального диапазона, по которым выполняется оптимизация.

Рис. 4 демонстрирует отличие асинхронного параллельного метода PSO от его синхронного аналога. Асинхронность алгоритма важна для эффективного использования ресурсов кластера или суперкомпьютера, в частности, в гетерогенной среде.

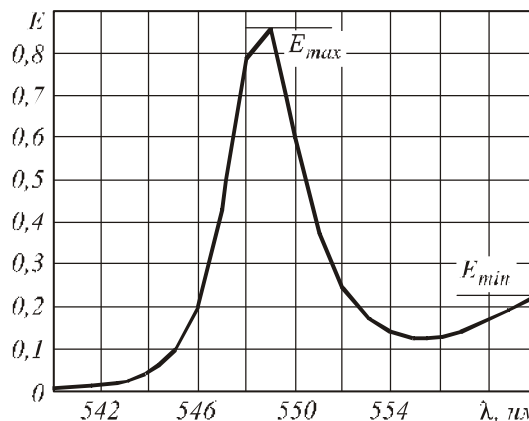


Рис. 5. Расчет контраста фильтра

Расчет допусков погрешностей изготовления и использования спектрального фильтра

Экспериментальный образец, или оттиск, для наноирирования создается напылением материала с высоким индексом рефракции на дифракционную решетку, изготовленную из материала с низким индексом рефракции. Первоначальная дифракционная решетка может быть изготовлена, например, с по-

мощью относительно недорогого метода интерферометрической литографии (interferometric lithography) [17].

При изготовлении наноструктуры, рассчитанной в предыдущем пункте, могут возникнуть погрешности, характерные для метода нанопринтинга. Например, глубина оттиска может отличаться от расчетной. В этом случае толщина слоя t (рис. 2) наноструктуры находится в некотором диапазоне $[t_{min}, t_{max}]$.

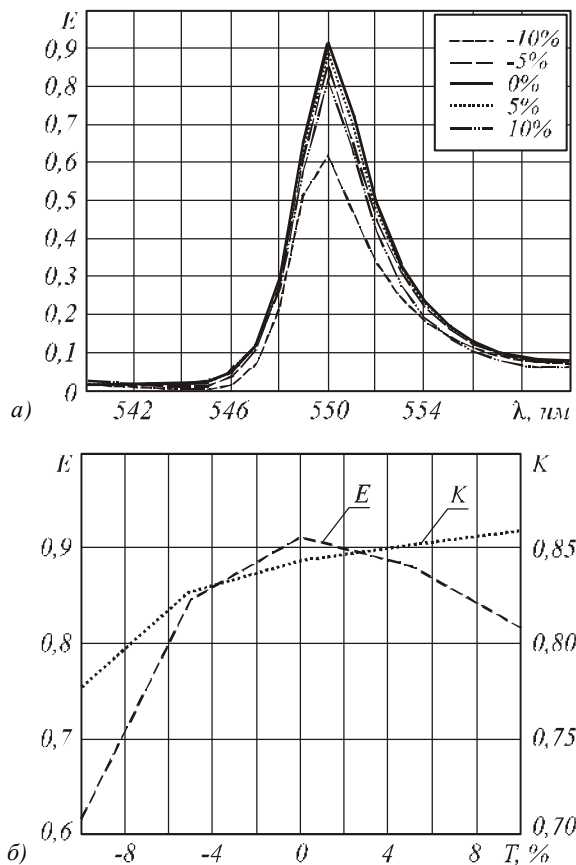


Рис. 6. Спектральные кривые (а) и контраст (б) для погрешности глубины оттиска при нанопринтинге

На рис. 6а показано, что при отклонении величины t от расчетной в диапазоне от -10% до +10% (т.е. погрешность T лежит в этом диапазоне) форма спектральной кривой фильтра меняется слабо. Эффективность фильтра меняется менее, чем на 10%, если t лежит в диапазоне от -5% до +10%. Контраст фильтра (рис. 6б) также остается достаточно стабильным.

В качестве еще одного примера погрешности изготовления рассмотрим отклонение коэффициента заполнения периода решетки от требуемого значения 1/2. Несколько спектральных кривых, соответствующих такой погрешности, приведены на рис. 7а. Допуски в диапазоне от -10% до +10% для эффективности и контраста фильтра показаны на рис. 7б. Для данного типа погрешности пик спектральной кривой существенно смещается от заданного значе-

ния. При этом эффективность и контраст фильтра уменьшаются слабо.

В завершение оценим требования к точности юстировки при использовании рассчитанного фильтра. Спектральные кривые для случая, когда угол падения света на фильтр отличается от нормального, приведены на рис. 8а. Очевидно, что данный фильтр чувствителен к погрешности угла падения света. Для отклонения угла падения более чем на ± 2 градуса эффективность фильтра существенно снижается. Контраст фильтра также значительно падает (рис. 8б).

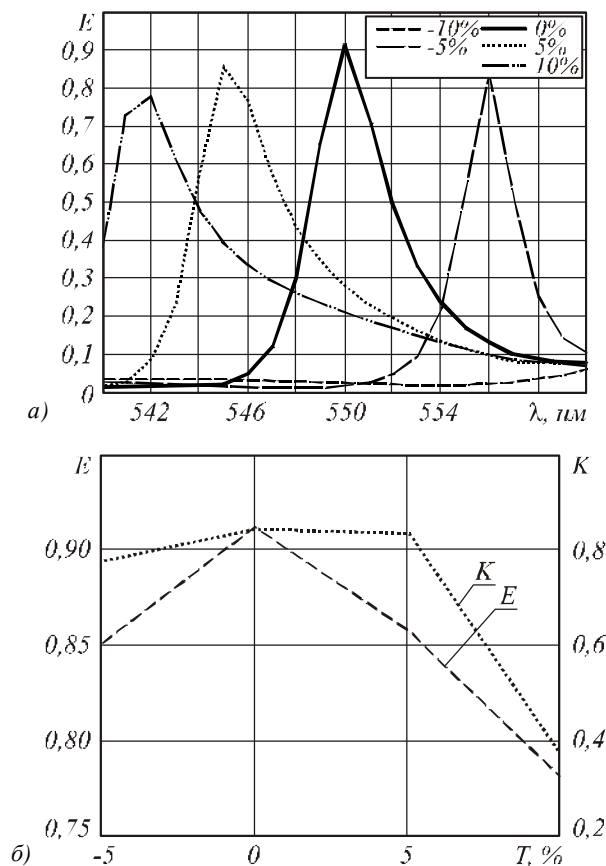


Рис. 7. Спектральные кривые (а) и контраст (б) для погрешности коэффициента заполнения дифракционной решетки при нанопринтинге

Отметим, что информация о требуемых допусках изготовления наноструктуры может быть включена в критерий качества оптимизационного алгоритма. В этом случае возможен более гибкий дизайн фильтра с учетом, например, особенностей технологической установки для изготовления фильтра или условий использования фильтра.

Заключение

Описанные в настоящей статье структуры и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, фильтры с волноводным резонансом используют на порядки меньшее количество тонкопленочных слоев, чем традиционные фильтры. Во-вторых, показана возможность создания высокоэффективных (более 90%) пропускаю-

щих спектральных фильтров, при изготовлении которых используются материалы с достаточно низким коэффициентом рефракции. Это расширяет список материалов для производства подобных фильтров. В-третьих, продемонстрирована возможность проектирования таких фильтров для изготовления методом наноимпринтинга. Применение в данной работе параллельных стохастических методов оптимизации с асинхронным балансом загрузки суперкомпьютера позволяет повысить качество нанооптических устройств при неизменном времени, затрачиваемом на расчет подобных устройств. Таким образом, можно говорить об относительно недорогом массовом производстве нанооптических пропускающих спектральных фильтров, использующих волноводный резонанс.

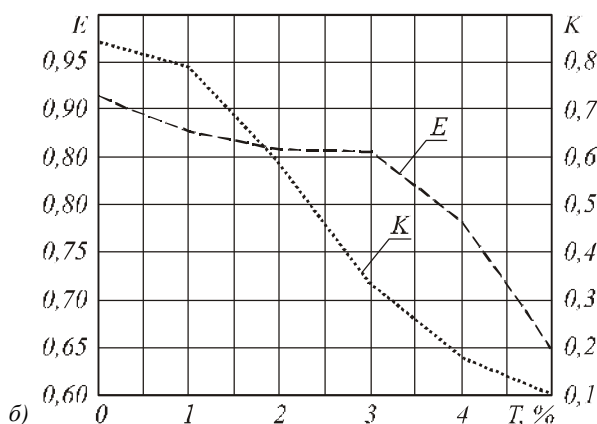
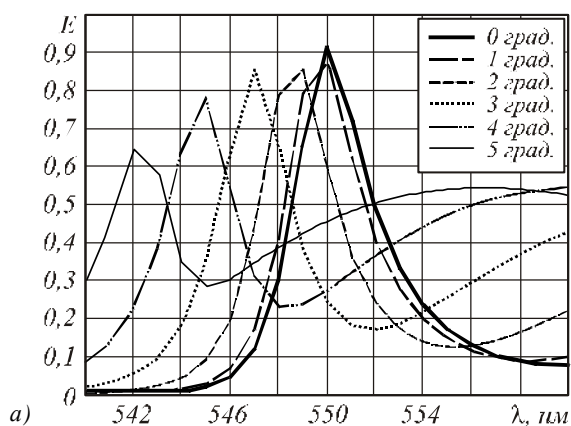


Рис. 8. Спектральные кривые (а) и контраст (б) для отклонения угла падения от нормального при использовании изготовленного фильтра

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ № НШ-7414.2010.9 и грантов Российского фонда фундаментальных исследований №№ 09-07-12147-офи_м, 09-07-92421-КЭ_а, 10-07-00553-а.

Список литературы

1. **Guo, L.Jay** Progress in nanoimprint technology and its applications. // *Guo, J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2004. – P. 123-141.

2. Color filter incorporating a subwavelength patterned grating in poly silicon / Yeo-Taek Yoon, Hong-Shik Lee, Sang-Shin Lee, Sang Hoon Kim, Joo-Do Park, Ki-Dong Lee // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, No. 4.
3. Two-dimensional photonic crystal color filter development / Eun-Hyoung Cho, Hae-Sung Kim, Byoung-Ho Cheong, Prudnikov Oleg, Wenxu Xianyua, Jin-Seung Sohn, Dong-Joon Ma, Hwan-Young Choi, No-Cheol Park, Young-Pil Park // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17, No. 10.
4. Fabrication of Transmission Color Filters Using Silicon Subwavelength Gratings on Quartz Substrates / Yoshiaki Kanamori, Masaya Shimono, and Kazuhiro Hane // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2006, October 15. – Vol. 18, No. 20.
5. **Ye, Y.** Color filter based on a two-dimensional submicrometer metal grating / Yan Ye, Yun Zhou, and Linsen Chen // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48, No. 27.
6. **Magnusson, R.** New principle for optical filters / R. Magnusson and S.S. Wang // *Appl. Phys. Lett.* – 1992. – V. 61. – P. 1022–1024.
7. **Moharam, M.G.** Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam, Drew A. Pomett, and Eric B. Grann // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1995, May. – V. 12(5). – P. 1077-1086.
8. **Peng, S.** Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings / S. Peng, G.M. Morris // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1995. – V. 12(5). – P.1087–1096.
9. **Li, L.** Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures / Lifeng Li // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1996. – V. 13(9). – P. 1870–1876.
10. **Babin, S.** SCATT: software to model scatterometry using the rigorous electromagnetic theory / S. Babin, L. Doskolovich, Y. Ishibashi, A. Ivanchikov, N. Kazanskiy, I. Kadamini, A. Mikami, Y. Yamazaki // *Proc. SPIE*. – 2009. – Vol. 7272, *Advanced Lithography*. – P. 72723X. – DOI:10.1117/12.816904.
11. **Безус, Е.А.** Расчет дифракционных структур для фокусировки поверхностных электромагнитных волн / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов, М. Пицци, П. Перло // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 2. – С. 185-192.
12. **Казанский, Н.Л.** Расчет оптимальных пересечений фотонно-кристаллических волноводов методом передаточной матрицы / Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович, С.И. Харитонов // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2002. – Том 4, № 2. – С. 300-307.
13. **Волоотовский, С.Г.** Методологические аспекты создания параллельных приложений в области компьютерной оптики и обработки изображений / С.Г. Волоотовский, Н.Л. Казанский, С.Б. Попов, П.Г. Серафимович, В.А. Сойфер, В.А. Фурсов // *Труды научно-методической конф. «Телематика 2002»*, СПб., 2002. – С. 163-165.
14. **Казанский, Н.Л.** Математическое моделирование оптических систем – Самара: СГАУ, 2004. – 240 с.
15. **Shokooh-Saremi, M.** Particle swarm optimization and its application to the design of diffraction grating filters / M. Shokooh-Saremi and R. Magnusson // *Optics Letters*, – 2007. – V. 32, No. 8. – P. 894-896.
16. **Koh, B.-I.** Parallel asynchronous particle swarm optimization / Byung-II Koh, Alan D. George, Raphael T. Haftka and Benjamin J. Fregly // *Int. J. Numer. Meth. Engng.* – 2006. – V. 67. –P. 578–595.
17. **Brueck, S.R.J.** Optical and Interferometric Lithography – Nanotechnology Enablers, *Proc. IEEE*. –2005. –Vol. 93. – №. 10/ -P.1704-1721.

References

1. **Guo, L.Jay** Progress in nanoimprint technology and its applications // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2004. – P. 123-141.
2. Color filter incorporating a subwavelength patterned grating in poly silicon / Yeo-Taek Yoon, Hong-Shik Lee, Sang-Shin Lee, Sang Hoon Kim, Joo-Do Park, Ki-Dong Lee // *Optics express.* – 2008. – Vol. 16, No. 4.
3. Two-dimensional photonic crystal color filter development / Eun-Hyoung Cho, Hae-Sung Kim, Byoung-Ho Cheong, Prudnikov Oleg, Wenxu Xianyua, Jin-Seung Sohn, Dong-Joon Ma, Hwan-Young Choi, No-Cheol Park, Young-Pil Park // *Optics express.* – 2009. – Vol. 17, No. 10.
4. Fabrication of Transmission Color Filters Using Silicon Subwavelength Gratings on Quartz Substrates / Yoshiaki Kanamori, Masaya Shimon, and Kazuhiro Hane // *IEEE photonics technology letters.* – 2006, October 15. – Vol. 18, No. 20.
5. **Ye, Y.** Color filter based on a two-dimensional submicrometer metal grating / Yan Ye, Yun Zhou, and Linsen Chen // *Applied optics.* – 2009. – Vol. 48, No. 27.
6. **Magnusson, R.** New principle for optical filters / R. Magnusson and S.S. Wang // *Appl. Phys. Lett.* – 1992. – V. 61. – P. 1022–1024.
7. **Moharam, M.G.** Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam, Drew A. Pommet, and Eric B. Grann // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1995, May. – V. 12(5). – P. 1077-1086.
8. **Peng, S.** Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings / S. Peng, G.M. Morris // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1995. – V. 12(5). – P.1087–1096.
9. **Li, L.** Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures / Lifeng Li // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1996. – V. 13(9). – P. 1870–1876.
10. **Babin, S.** SCATT: software to model scatterometry using the rigorous electromagnetic theory / S. Babin, L. Doskolovich, Y. Ishibashi, A. Ivanchikov, N. Kazanskiy, I. Kadamini. A. Mikami, Y. Yamazaki // *Proc. SPIE.* – 2009. – Vol. 7272, *Advanced Lithography.* – P. 72723X. – DOI:10.1117/12.816904.
11. **Bezus, E.A.** Diffraction structures calculation for focusing of surface electromagnetic waves / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov, M. Pizzi, P. Perlo // *Computer Optics.* – 2009. – V. 33, N 2. – P. 185-192. – (in Russian)
12. **Kazanskiy, N.L.** Calculation of optimal crosssections of photonic crystals waveguides by transfer matrix method / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.I. Kharitonov // *Izvestia of Samara Science Center RAS.* – 2002. – V. 4, N 2. – P. 300-307. – (in Russian)
13. **Volotovskiy, S.G.** Methodical topics of development parallel applications for computer optics and image processing fields, (in Russian) / S.G. Volotovskiy, N.L. Kazanskiy, S.B. Popov, P.G. Serafimovich, V.A. Soifer, V.A. Fursov // *Proc. Conf. "Telematica 2002"*, St-Peterburg, 2002. – P. 163-165.
14. **Kazansky, N.L.** *Mathematical Modeling of Optical Systems* – Samara: SSAU, 2004. – 240 p.
15. **Shokooh-Saremi, M.** Particle swarm optimization and its application to the design of diffraction grating filters / M. Shokooh-Saremi and R. Magnusson // *Optics Letters.* – 2007. – V. 32, No. 8. – P. 894-896.
16. **Koh, B.-I.** Parallel asynchronous particle swarm optimization / Byung-Il Koh, Alan D. George I, Raphael T. Haftka and Benjamin J. Fregly // *Int. J. Numer. Meth. Engng.* – 2006. – V. 67. – P. 578–595.
17. **Brueck, S.R.J.** *Optical and Interferometric Lithography* – *Nanotechnology Enablers*, Proc. IEEE, 2005, Vol. 93, No. 10, P.1704-1721.

USING GUIDED-MODE RESONANCE TO DESIGN NANO-OPTICAL SPECTRAL TRANSMISSION FILTERS

N.L. Kazanskiy^{1,2}, P.G. Serafimovich², S.B. Popov^{1,2}, S.N. Khonina^{1,2}

¹ S.P. Korolev Samara State Aerospace University,

² Image Processing Systems Institute RAS

Abstract

Optimization of nano-optical spectral transmission filter is considered. Structure of the designed device takes into account details of its subsequent fabrication by nanoimprinting lithography. The filter optimization performed on computational cluster with parallel asynchronous stochastic method. Analysis of fabrication of the designed filter with nanoimprinting lithography is shown.

Key words: nanooptics, spectral filter, nanoimprinting, stochastic optimization methods, parallel calculation, asynchronous algorithm.

Сведения об авторах



Казанский Николай Львович, 1958 года рождения. В 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 год), профессор, работает заместителем директора по научной работе и заведующим лабораторией дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Руководитель научно-образовательного центра компьютерной оптики, созданного совместно ИСОИ РАН и СГАУ, заведующий базовой (СГАУ в ИСОИ РАН) кафедрой высокопроизводительных вычислений. Является членом международных научных обществ *SPIE* и *IAPR*. Казанский Н.Л. – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и

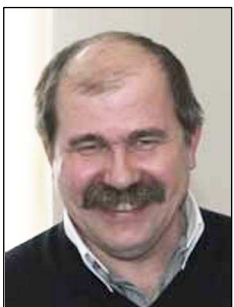
нанопотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 240 статей, 7 монографий, 35 авторских свидетельств и патентов. Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazansky.htm>. E-mail: kazansky@smr.ru.

Nikolay Lvovich Kazanskiy (b. 1958) graduated with honours (1981) from the S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU)), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Maths (1996) degrees from Samara State Aerospace University. He is the vice-director for research and the head of Diffractive Optics laboratory at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is the manager of the Research & Education Center of Computer Optics established jointly by SSAU and IPSI RAS, holding the chair of SSAU's base sub-department of High-Performance Computing at IPSI RAS. He is a SPIE and IAPR member. He is co-author of 240 scientific papers, 7 monographs, and 35 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. Homepage: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazansky.htm>. E-mail: kazansky@smr.ru.



Серафимович Павел Григорьевич, кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. E-mail: serp@smr.ru. Области научных интересов: моделирование и проектирование нанооптических устройств, методы исследования фотонных кристаллов, разработка и исследование программных средств распределенной и параллельной обработки крупноформатных изображений.

Pavel Grigorievich Serafimovich Candidate in Physics and Mathematics; Senior researcher at the Image Processing Systems Institute of RAS. His areas of research are nanooptics, simulation and design of photonic crystals, parallel and distributed image processing. E-mail: serp@smr.ru



Попов Сергей Борисович, кандидат технических наук, доцент Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева; старший научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. E-mail: spop@smr.ru Области научных интересов: моделирование, разработка и исследование программных средств распределенной и параллельной обработки крупноформатных изображений; разработка алгоритмов и программного обеспечения систем технического зрения; разработка алгоритмов повышения качества цветных слабоконтрастных изображений.

Sergey Borisovich Popov Candidate in Technical Science; Associate Professor of the Samara State Aerospace University; Senior researcher at the Image Processing Systems Institute of RAS. His areas of research are parallel and distributed image processing, computer vision, color image processing. E-mail: spop@smr.ru



Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева; ведущий научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. E-mail: khonina@smr.ru .Области научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений.

Svetlana Nikolaevna Khonina Doctor of Physics & Math; Professor of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev; Leading researcher at the Image Processing Systems Institute of the RAS. E-mail: khonina@smr.ru. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.

Поступила в редакцию 19 мая 2010 г.