

А. М. Артамонов

ООО «ИЗОВАК Технологии», Минск, Беларусь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНДЕНСАЦИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК И ПРЕПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ФИЛЬТРОВ

Линейные перестраиваемые фильтры являются одним из перспективных видов оптических изделий для создания приборов спектрометрии различного назначения. Применение данного вида изделий позволяет без снижения характеристик значительно упростить оптическую схему прибора. При использовании с классическими схемами линейные перестраиваемые фильтры дают возможность улучшить характеристики оптических устройств. С точки зрения технологии изготовления такого вида полосовых фильтров представляет собой достаточно сложную задачу. В статье представлены текущие результаты по разработке технологии производства линейных перестраиваемых фильтров. В ходе проведения работы было создано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать распределение сконденсированного материала на поверхности подложки с учетом геометрии источника, подложки, масок и всей системы в целом. Проведен расчет оптических характеристик и анализ физических толщин линейного перестраиваемого фильтра, получены зависимости изменения толщины покрытия от координаты подложки. В основу геометрической модели для расчета легла геометрия вакуумного технологического оборудования Advanced Optical Coater (ВТО АОС) производства ООО «ИЗОВАК» (Республика Беларусь). Исходя из полученных данных при помощи программного обеспечения предложена оптимальная геометрия вакуумной маски для получения требуемого спектрального градиента.

Ключевые слова: оптика, фильтры, спектрометрия, осаждение, магнетрон, плазма, вакуумное маскирование, численное моделирование

A. M. Artamonov

IZOVAC Technologies Ltd, Minsk, Belarus

NUMERICAL SIMULATION OF THIN FILM CONDENSATION PROCESSES AND PRE-PRODUCTION ANALYSIS OF LINEAR VARIABLE FILTERS

Linear variable filters are one of the promising types of optical elements for creating multipurpose spectrometers. Application of this type of elements allows simplifying the optical scheme of the device significantly without great reduction of its characteristics. Using classical optical systems, linear variable filters improve the performance of optical devices. From the technology point of view, making this type of bandpass filter is a rather complex task. Current results of technology development of linear variable filters are considered in the article. In the course of work, a software was developed to calculate the distribution of condensed material on the substrate surface, taking into account the geometry of the source, substrate, masks and the whole system. Calculation of optical characteristics and analysis of the physical thicknesses of a linear variable filter were performed, and the dependence of the thickness of the coating on the coordinate of the substrate was obtained. The geometrical model for calculation was based on the geometry of the vacuum technological equipment – Advanced Optical Coater (VTE AOC), manufactured by IZOVAC Ltd. (Republic of Belarus). Based on the data obtained by using the software, the optimal geometry of the vacuum mask was proposed to obtain the required spectral gradient.

Keywords: optics, filters, spectrometry, deposition, magnetrons, plasma, vacuum mask, numerical simulation

Введение. Требования к оптическим интерференционным покрытиям постоянно возрастают, что требует создания новых подходов к технологии производства таких покрытий. В настоящей статье представлены результаты работы по созданию технологии производства линейных перестраиваемых фильтров.

Линейные перестраиваемые фильтры (Linear Variable Filter) представляют собой класс полосовых фильтров на основе сложных многослойных интерференционных покрытий и обладают линейной анизотропией оптических свойств по одной из геометрических осей, которая позволяет перестраивать выделяемую (фильтруемую) длину волны оптического излучения [1, с. 44–49].

Анизотропия оптических свойств как правило осуществляется за счет создания управляемой неравномерности вдоль оси, по которой происходит перестроение длины волны. При этом

основным параметром такого типа полосовых фильтров является величина спектрального градиента, определяющая изменение оптической характеристики на единицу длины фильтра.

Одним из способов управления неравномерностью тонкопленочных покрытий, получаемых в процессах вакуумного напыления, является вакуумное маскирование [2, с. 106–107]. Такой способ в основном применяется для формообразования оптических поверхностей, а также для повышения степени равномерности вакуумного напыления покрытий сверх той, которая обусловлена геометрией расположения технологических устройств и подложки [3].

Цель работы состояла в определении параметров геометрии вакуумной маски и расположения в пространстве вакуумной камеры для получения линейного перестраиваемого фильтра с величиной спектрального градиента 20 нм/мм в диапазоне длин волн 400–700 нм.

Основная часть. Для математического расчета геометрии вакуумных масок, а также исследования влияния геометрии на распределение материала на поверхности детали необходимо обратиться к модели Кнудсена (рис. 1), следующей из молекулярно-кинетической теории. Данная модель описывает распределение потока эмитированных частиц из элемента площади источника dS , подчиняется косинусному распределению и может быть описана следующим выражением:

$$J_{\theta} = \frac{Q}{\pi r^2} \cos \theta, \quad (1)$$

где Q – скорость эмиссии частиц из элемента площади источника, r – расстояние от элемента площади источника, θ – угол от нормали элемента площади источника.

Плотность конденсирующихся частиц можно получить, учитывая произвольно расположенный элемент площади поверхности подложки dA , а выражение (1) представить в следующем виде:

$$J = \frac{Q}{\pi r^2} \cos \theta \cos \phi, \quad (2)$$

где ϕ – угол от нормали элемента площади поверхности подложки.

В работах [3–5] вычисление распределения сконденсировавшегося материала на поверхности подложки выполняется аналитическим интегрированием. При этом для системы источник–подложка выводится частная подинтегральная функция из уравнения (2) с учетом особенностей системы, таких как: геометрия подложки, геометрия источника, движение подложки относительно источника и других параметров, описывающих систему. При внедрении в математическую модель геометрии маски сложность подинтегральной функции значительно возрастает, а применение аналитических методов интегрирования становится затруднительным при проведении моделирования с вариативностью геометрии маски.

Для расчета профилей распределения частиц было разработано программное обеспечение в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio. Данное программное обеспечение позволяет рассчитывать профили распределения сконденсированных частиц на плоских и сферических поверхностях. Задание математической модели источника частиц проведено при помощи генератора, входными данными для которого стали линейные размеры и материал эмитируемых частиц, при этом расчетная сетка генерировалась автоматически. Вычисление произведено методами численного интегрирования с оценкой погрешности по правилу Рунге. С целью уточнения результатов расчета в модель был введен учет длины свободного пробега частиц путем добавления молекулярного рассеяния на атомах рабочего газа.

В основу геометрической модели для расчета легла геометрия вакуумного технологического оборудования Advanced

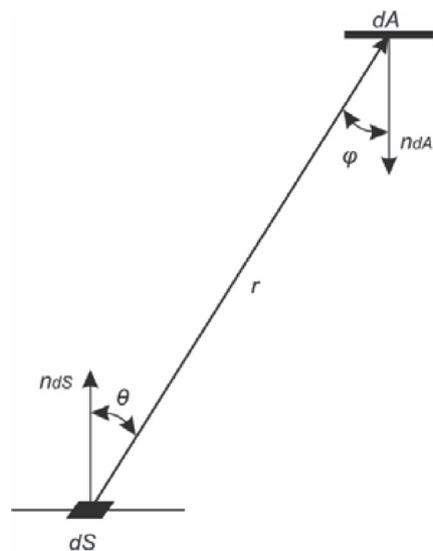


Рис. 1. Модель распределения частиц из точечного источника

Fig. 1. Particles distribution model from a point source

Optical Coater (ВТО АОС) производства ООО «ИЗОВАК» (Республика Беларусь). Осаждение материала на ВТО АОС происходит методом квазиреактивного магнетронного распыления с ассистированием высокочастотной плазмой. ВТО АОС представляет собой установку шлюзового типа, в которой на держателе-барабане размещаются подложки. После их размещения транспортная система, входящая в состав ВТО АОС, переносит держатель-барабан в вакуумную камеру. В вакуумной камере расположены две работающие на переменном токе магнетронные станции с металлическими мишенями для нанесения низко- и высокопреломляющих материалов. Окисление и ассистирование наносимой пленки радикалами и ионами химически активных газов производится радиочастотным плазменным генератором с частотой генерации кислородной плазмы 13,56 МГц.

Оптический дизайн синтезирован в программном комплексе расчета OptiLayer. Формула покрытия представлена следующим выражением: 3(HL)+2H+3(LH)+L+3(HL)+2H+3(LH), где в качестве материала с высоким уровнем показателя преломления (H) выступает Nb_2O_5 , а с низким уровнем показателя преломления (L) – SiO_2 . Для расчета геометрии вакуумной маски получены распределения физических толщин материалов для требуемого диапазона перестройки путем сдвига расчетной длины волны покрытия (таблица)

Результаты анализа оптического дизайна
Results of optical design analysis

Длина волны, нм	Материал слоя	Оптическая толщина, $\lambda/4$	Физическая толщина, нм	Отклонение, %	Относительная неравномерность, %
400	H	1	40,30	51,9	48,1
	L	1	67,60	57,1	42,9
550	H	1	59,22	76,3	23,7
	L	1	92,96	78,5	21,5
700	H	1	77,60	100	0
	L	1	118,40	100	0

Установлено, что для достижения требуемого спектрального градиента необходимо обеспечить неравномерность слоев Nb_2O_5 на уровне 48,1 %, а SiO_2 – на уровне 42,9 %. Данные значения свидетельствуют о линейности зависимости относительной неравномерности от координаты подложки. Полученная разница для Nb_2O_5 и SiO_2 объясняется различной дисперсионной характеристикой показателя преломления каждого материалов. Таким образом получен общий вид геометрии вакуумной маски, представляющий собой во фронтальной проекции равнобедренную трапецию (рис. 2). Изменяя угол наклона боковых граней, можно управлять распределением материала по поверхности подложки в поперечной оси. Для простоты описания геометрии маски, а также ввиду того, что держатель-барабан имеет форму цилиндра, геометрия маски во время проведения расчета задавалась в цилиндрических координатах (r , φ , z). При этом радиальные координаты r_1 и r_2 для нижнего и верхнего оснований трапеции были приравнены к радиусу держателя-барабана 210 мм. Координаты по оси аппликат были заданы согласно размеру активной области полосового фильтра, на котором осуществляется перестройка длины волны для получения установленного спектрального градиента: $z_1 = 0$ мм для нижнего основания и $z_2 = 30$ мм для верхнего основания.

После установки граничных условий на геометрию маски были проведены численные моделирования процессов конденсации пленки с учетом геометрии вакуумной маски. При этом значение полярных углов φ_1 и φ_2 для нижнего и верхнего оснований трапеции

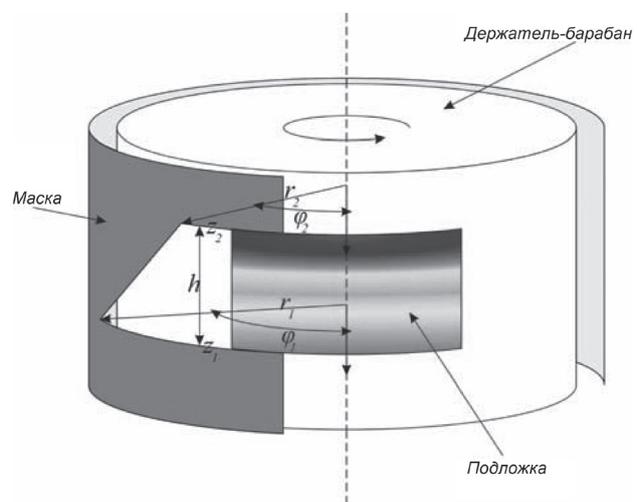
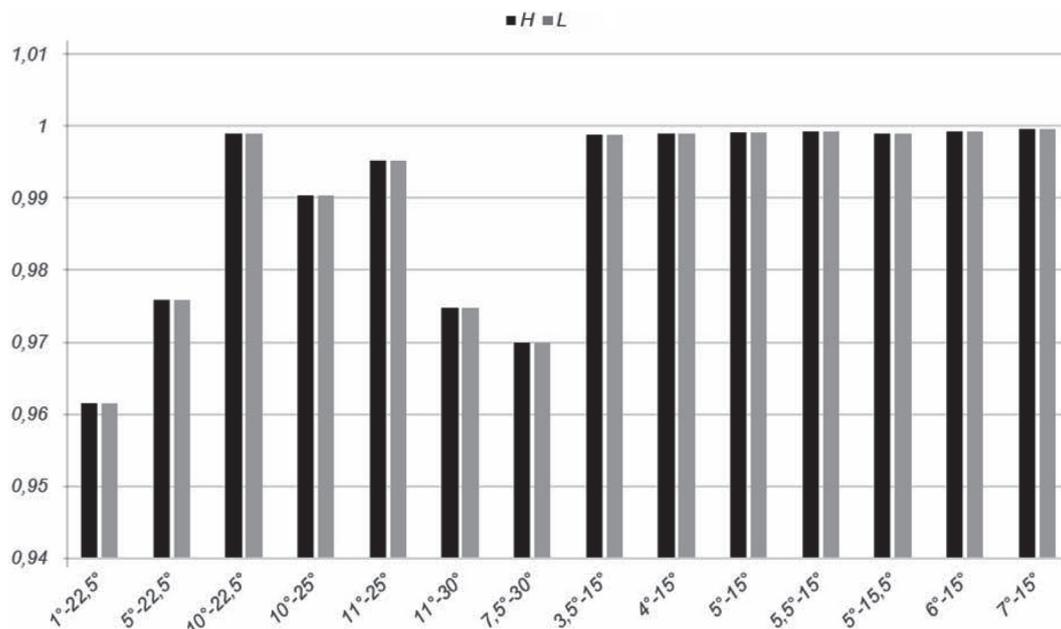


Рис. 2. Геометрия маски в цилиндрических координатах
 Fig. 2. Mask geometry in cylindrical coordinate system

Рис. 3. Зависимость коэффициента линейной корреляции от полярных углов ϕ_1 и ϕ_2 Fig. 3. Pearson correlation coefficient versus azimuth ϕ_1 and ϕ_2

задавались с целью получения максимального значения коэффициента линейной корреляции r_{XY} между расчетной относительной неравномерностью и относительными неравномерностями, полученными в ходе анализа спектральной характеристики при заданном спектральном градиенте (рис. 3). Для нижнего основания трапеции были получены следующие координаты $(210, \pm 15^\circ, 0)$ для H и L, а для верхнего основания – $(210, \pm 7^\circ, 30)$ для H и $(210, \pm 6^\circ, 30)$ для L. Величины коэффициентов линейной корреляции r_{XY} для H и L составили 0,99956 и 0,99934 соответственно.

Заключение. В ходе работы показана возможность получения линейных перестраиваемых фильтров на ВТО АОС. Определены начальные цилиндрические координаты размеров вакуумных масок с минимальным коэффициентом линейной корреляции для материалов с учетом дисперсии показателей преломления для заданного спектрального градиента. Следует отметить, что при уточнении математической модели возможно повышение точности расчета вакуумных масок, но полностью исключить подстройку геометрии маски не представляется возможным, ввиду отсутствия возможности напыления с минимальным рабочим зазором между барабаном-держателем и подложкой.

Список использованных источников

1. Wolfe, W. L. Introduction to Imaging Spectrometers / W. L. Wolfe. – Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1997. – 148 с.
2. Каширин, В. И. Основы формообразования оптических поверхностей / В. И. Каширин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. – 254 с.
3. Oliver, J. Analysis of a planetary-rotation system for evaporated optical coatings / J. Oliver, D. Talbot // Appl. Opt. – 2006. – Vol. 45, N 13. – P. 3097–3105.
4. Theoretical design of shadowing masks for uniform coatings on spherical substrates in planetary rotation systems / Liu Cunding [et al.] // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20, N 21. – P. 23790–23797.
5. Сенник, Б. Н. Метод определения площади функциональной маски для вакуумной асферизации / Б. Н. Сенник // Приклад. физика. – 2007. – № 3. – С. 129–135.

References

1. Wolfe W. L. *Introduction to Imaging Spectrometers*. Bellingham, SPIE Optical Engineering Press, 1997, 148 p. Doi: 10.1117/3.263530
2. Kashirin V. I. *Fundamentals of the optical surfaces forming*. Ekaterinburg, Ural State Technical University – UPI, 2006, 254 p. (in Russian).
3. Oliver J., Talbot D. Analysis of a planetary-rotation system for evaporated optical coatings. *Applied Optics*, 2006, vol. 45, no. 13, pp. 3097–3105. Doi: 10.1364/AO.55.008550

4. Cunding Liu, Mingdong Kong, Chun Guo, Weidong Gao, Bincheng Li. Theoretical design of shadowing masks for uniform coatings on spherical substrates in planetary rotation systems. *Optics Express*, 2012, vol. 20, iss. 21, pp. 23790–23797. Doi: 10.1364/OE.20.023790

5. Senik B. N. The method of definition of the area of a functional mask for vacuum asphereization. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2007, vol. 3, pp. 129–135 (in Russian).

Информация об авторе

Артамонов Артем Максимович – начальник бюро оптико-электронных приборов, ООО «ИЗОВАК Технологии» (ул. Богдановича, 155, офис 907, 220040, Минск, Республика Беларусь). E-mail: artamonov@izovac.com

Information about the author

Artamonov Artem Maksimovich – Chief of Bureau of Optoelectronic Devices, IZOVAC Technologies Ltd. (155-907, M. Bogdanovich Str., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: artamonov@izovac.com

Для цитирования

Артамонов, А. М. Численное моделирование процессов конденсации тонких пленок и предпроизводственный анализ линейных перестраиваемых фильтров / А. М. Артамонов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 49–53.

For citation

Artamonov A. M. Numerical simulation of thin film condensation processes and pre-production analysis of linear variable filters. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 2, pp. 49–53 (in Russian).