

38. Оптический фильтр, построенный с применением глубокой периодической отражающей рельефной структуры

В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов Н. В. Суетин
 Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

В схеме фильтра применена глубокая рельефная отражающая периодическая дифракционная структура (ГРС) с глубиной прямоугольного рельефа более половины длины волны. Входной оптический пучок направляется на ГРС под углом. Плоскость падения параллельна линиям дифракционной структуры. Пучок нулевого порядка дифракции является выходным. Зависимость коэффициента передачи мощности с входа на выход от длины волны излучения имеет нули и максимумы на определённых длинах волн. Фильтр может быть настроен на полное подавление любой выбранной длины волны и легко перестраивается за счёт изменения угла падения входного пучка. Приведены примеры расчёта фильтра для подавления одной из спектральных линий излучения аргонового лазера при условии пропускания другой спектральной линии. Фильтр одинаково прост для практической реализации как в видимом, так и инфракрасном диапазоне.

Ключевые слова: Оптический спектральный фильтр, глубокая дифракционная периодическая структура, фильтр оптического сигнала, пространственный фильтр.

Цитирование: Комоцкий, В. А. Оптический фильтр, построенный с применением глубокой периодической отражающей рельефной структуры / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов Н. В. Суетин // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 165–169.

Введение

Глубокие отражающие периодические рельефные дифракционные структуры (ГРС) с прямоугольным профилем типа «меандр» с глубиной H_p порядка нескольких длин волн оптического излучения λ были описаны нами ранее в статьях [1, 2], где они применялись для построения высокочувствительных оптоэлектронных датчиков угловых колебаний поверхностей. Для этих устройств ГРС были изготовлены методом химического травления поверхности стекла через маску из фоторезиста с последующим напылением на поверхность рельефа металлической плёнки с высоким коэффициентом отражения для достижения высокой эффективности устройства. Вместе с тем в [3] было описано применение периодических прозрачных рельефных структур с прямоугольным профилем в качестве спектральных фильтров. Однако эти фильтры не допускали перестройки частотных характеристик после их изготовления. В данном докладе мы рассмотрим фильтр, построенный на основе *отражающей* периодической структуры, который допускает перестройку его частотной характеристики в широком диапазоне за счёт изменения угла падения входного излучения на ГРС. Фильтры, построенные на основе отражающих ГРС, просты в изготовлении и могут быть применены для фильтрации как в видимом, так и в инфракрасном диапазонах излучения.

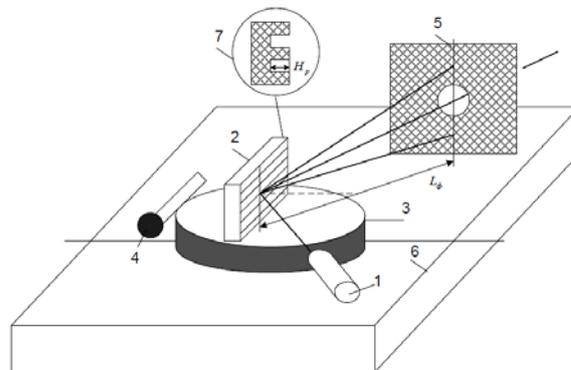
1. Схема фильтра, основные расчётные соотношения

Схема прохождения оптического пучка через фильтр на основе ГРС изображена на рис. 1. Входной пучок излучения направлен под углом падения Θ на ГРС с прямоугольным профилем типа «меандр» с глубиной рельефа H_p . Плоскость падения параллельна линиям рельефа ГРС. Глубину пространственной фазо-

вой модуляции (ПФМ), полученную в результате отражения оптической волны от ГРС, можно выразить формулой [2]: $\Delta\Phi = (4\pi/\lambda)H_p \cos\Theta$. Как видно, она уменьшается при увеличении угла падения Θ . Амплитуда ПФМ волнового фронта Φ_M равна половине глубины ПФМ: $\Phi_M = \Delta\Phi/2$, и она выражается следующей формулой [1, 2].

$$\Phi_M = (2\pi/\lambda)H_p \cos\Theta. \quad (1)$$

После отражения от ГРС на выходе мы выделяем нулевой порядок дифракции с помощью простого пространственного фильтра — диафрагмы, которая расположена на расстоянии L_ϕ от ГРС, достаточном для разделения в пространстве пучков излучений нулевого и первого порядков дифракции. Зависимость мощности излучения P_0 в нулевом порядке дифракции от глубины H_p отражающей дифракционной структуры и от угла падения входного оптического пучка Θ определяется соотношением [1, 2].



1 — источник излучения, 2 — ГРС, 3 — поворотная платформа для регулировки угла падения входного пучка, 4 — механизм поворота платформы, 5 — пространственный фильтр, 6 — основание, 7 — форма профиля ГРС. Плоскость падения — отражения пучка параллельна линиям ГРС

Рис. 1 Схема фильтра с применением ГРС

$$P_0 = P_{\text{ВХ}} R \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} H_p \cos \Theta \right) = P_{\text{эфф}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} H_p \cos \Theta \right) \right), \quad (2)$$

где $P_{\text{ВХ}}$ — мощность излучения, падающего на ГРС, R — коэффициент отражения поверхности ГРС, $P_{\text{эфф}} = P_{\text{ВХ}} R$ — эффективная мощность излучения.

Как видно из зависимостей $P(\Theta)$, приведенных на рис. 2а, 2б), мощность излучения в нулевом дифракционном порядке изменяется в диапазоне от нулевой величины $P_0 = 0$ до максимальной величины, которая равна: $P_0^{(\text{max})} = P_{\text{ВХ}} R = P_{\text{эфф}}$. Из формулы (2) следует, что максимумы мощности отражённого излучения в нулевом порядке дифракции наблюдаются при следующих углах падения.

$$\Theta_{\text{max}}^{(k)} = \arccos \left(k\lambda / 2H_p \right), \quad (3)$$

где число $k = 0, 1, 2, 3...$

Значению $k = 0$ соответствует угол падения $\Theta = 90^\circ$, что физически нереально. Минимумы мощности отражённого излучения $P_0^{(\text{min})}$ наблюдаются при следующих углах падения.

$$\Theta_{\text{max}}^{(n)} = \arccos \left(\frac{2n+1}{4H_p} \lambda \right) = \arccos \left(\frac{2n+1}{4|\gamma|} \right), \quad (4)$$

где число $n = 0, 1, 2, 3...$

Экспериментальные зависимости нормированной мощности излучения нулевого порядка дифракции от угла падения оптического пучка на ГРС, приведенные на рис. 2а и 2б, с высокой степенью точности совпадают с расчётными кривыми. Это подтверждает правомерность применения в дальнейших расчётах формул (2), (3) и (4).

2. Расчёты параметров фильтров

Вначале рассмотрим наиболее простой фильтр, который подавляет излучение на определённых длинах волн. Зависимость коэффициента передачи мощности излучения k_p с входа на выход устройства от длины волны излучения будет выражена соотношением, которое следует из (2)

$$k_p = P_0 / P_{\text{ВХ}} \cdot R = \cos^2 \left[(2\pi H_p / \lambda) \cos \Theta \right]. \quad (5)$$

На рис. 3 приведено семейство расчётных зависимостей $k_p(\lambda)$ при условии, что глубина рельефной структуры равна $H_p = 0,6$ мкм, при различных значениях параметра угла падения светового пучка на рельефную структуру. Этот график демонстрирует возможность перестройки расположения частот максимума и минимума коэффициента пропускания за счёт изменения угла падения Θ входного оптического пучка. При различных углах падения нулевые коэффициенты передачи фильтра соответствуют разным длинам волн, координаты которых на оси длин волн можно рассчитать по формуле

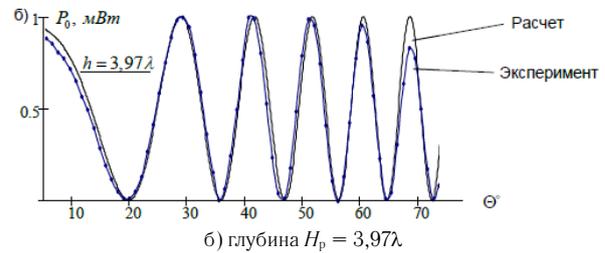
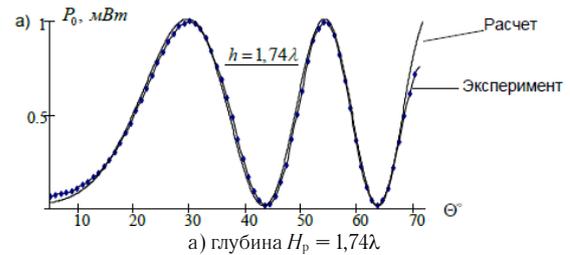


Рис. 2. Графики экспериментальных и расчётных зависимостей $P_0(\Theta)$ для рельефных отражающих решеток (период $\Lambda_p = 100$ мкм). Каждый график нормирован на максимальное значение мощности в пучке нулевого порядка.

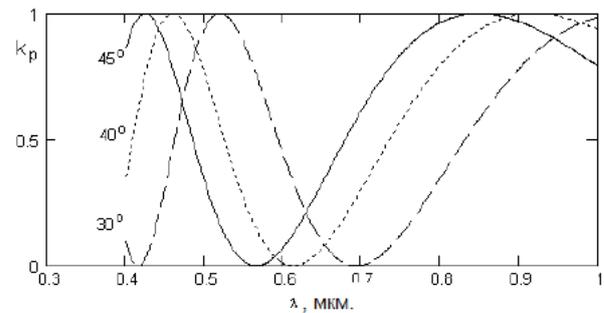


Рис. 3. Зависимости нормированного коэффициента передачи фильтра, от длины волны падающего излучения при глубине ГРС: $H_p = 0,6$ мкм, рассчитанные при различных углах падения: $\Theta = 45^\circ, 40^\circ, 30^\circ$.

$$\lambda_{\text{min}}^{(n)} = \frac{4H_p}{2n+1} \cos \Theta. \quad (6)$$

Как следует из анализа формулы (6) и из графиков, приведенных на рис. 3, фильтр на основе ГРС можно настроить на подавление излучения с любой длиной волны в широком диапазоне. Если излучение с некоторой длиной волны подавлено и не проходит на выход в нулевой порядок, то оно передаётся в первые и в высшие порядки дифракции.

Разделяющие фильтры. Поставим задачу: выделить излучение одной из спектральных линий аргонового лазера, которая имеет длину волны $\lambda_2 = 0,514$ мкм и, вместе с тем, подавить излучение другой сильной спектральной линии аргонового лазера, с длиной волны $\lambda_1 = 0,488$ мкм. Коэффициент передачи мощности излучения с входа на выход фильтра должен быть максимальным ($k_p^{(\text{max})}$) на длине волны $\lambda_{\text{max}} = \lambda_2 = 0,514$ мкм, а на длине волны

$\lambda_{\min} = \lambda_1 = 0,488$ мкм — должен быть минимальным ($k_p^{(\min)}$).

Рассмотрим соотношения, используя которые можно приближённо оценить необходимую глубину рельефной структуры. Отношение длин волн, соответствующих максимальному и минимальному значениям коэффициента передачи мощности излучения с входа на выход устройства составит

$$\lambda_2/\lambda_1 = 0,514/0,488 = 1,0532.$$

Далее из формул (3) и (4) определим расчетное соотношение длин волн, соответствующих максимальному и минимальному коэффициентам передачи устройства с учётом условия, что угол падения в этих формулах будет один и тот же. Приравняв углы падения в формулах (3) и (4), получим

$$\frac{\lambda_{\min}}{4H_p}(1+2n) = k \frac{\lambda_{\max}}{2H_p}.$$

Отсюда следует соотношение, полезное для дальнейших оценок.

$$\beta = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = \frac{1+2n}{2k}. \quad (7)$$

Можно рассматривать разные варианты: $k \neq n$ или $k = n$. Если положить $k = n$, то соотношение (7) примет вид

$$\beta = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = \frac{1+2n}{2n}.$$

Из этого следует, что если взять значение $n = 11$, то величина β составит

$$\beta = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = \frac{23}{22} = 1,045,$$

а если положить $n = 10$, то величина

$$\beta = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = \frac{21}{20} = 1,05,$$

что очень близко к ранее рассчитанному отношению $\lambda_2/\lambda_1 = 1,0532$, полученному для заданных выше длин волн линий аргонового лазера. С учётом этих условий определим подходящую глубину рельефа H_p , для чего найдём связь между величиной H_p и числом n . Аргумент функции в формуле (4) не может быть больше единицы, следовательно, должно выполняться условие

$$\frac{2n+1}{4\gamma} \leq 1.$$

Отсюда следует, что число γ должно удовлетворять следующему условию.

$$\gamma \geq \frac{2n+1}{4}. \quad (8)$$

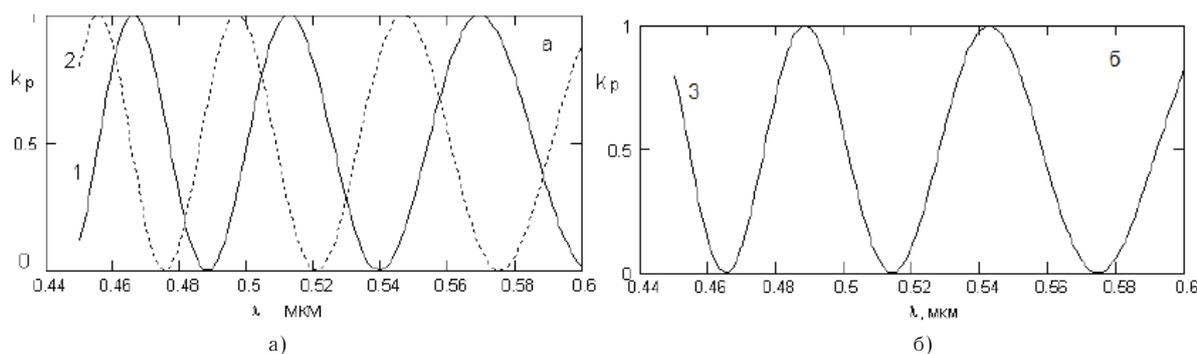
При этом, если принять, что $n = 10$, то из формулы (8) следует, что величина $\gamma \geq 5,25$, а при $n = 11$ величина $\gamma \geq 5,75$. Исходя из этого, можно выбрать значение параметра $\gamma = H_p/\lambda = 6$. Тогда глубина рельефа должна

составлять 6 длин волн. Для построения фильтра выберем глубину рельефа $H_p = 3$ мкм, а число $n = 10$. При этих условиях найдём угол падения оптического пучка, при котором коэффициент передачи излучения с длиной волны $\lambda_1 = 0,488$ мкм будет равен нулю. При $n = 10$, получим в соответствии с формулой (4) расчётное значение угла падения: $\Theta_{\min} = 31,35^\circ$. При этом же значении угла падения $\Theta_{\min} = 31,35^\circ$ расчёт по формуле (5) величины коэффициента передачи мощности фильтра на длине волны $\lambda_2 = 0,514$ мкм даёт следующий результат: $k_p = 0,998$, что вполне соответствует поставленной задаче. Зависимость коэффициента передачи мощности фильтра от длины волны излучения в диапазоне длин волн от 0,44 мкм до 0,6 мкм, рассчитанная при значениях параметров: $\Theta_{\min} = 31,35^\circ$, $H_p = 3$ мкм, приведена на рис. 4а (график 1). Один из нулей этой зависимости точно соответствует длине волны $\lambda_1 = 0,488$ мкм.

Рассмотрим, как влияет неточность глубины рельефа на параметры фильтра. Допустим, что в результате ошибок при изготовлении глубина ГРС составила 3,2 мкм вместо расчётной глубины 3 мкм. Положим, что угол падения остаётся при этом неизменным, равным $\Theta_{\min} = 31,35^\circ$. В этом случае, как это видно из графика 2, приведенного на рис. 4а, кривая зависимости коэффициента передачи от длины волны значительно смещена по оси длин волн по отношению к графику 1. Минимумы коэффициента передачи этой зависимости, ближайшие к заданной длине волны минимума $\lambda_1 = 0,488$ мкм, находятся на следующих длинах волн: при $n = 10$ — на длине волны $\lambda_{\min}^{(10)} = 0,52$ мкм, а при $n = 11$ — на длине волны $\lambda_{\min}^{(11)} = 0,475$ мкм.

Вместе с тем, погрешность настройки фильтра, которая образовалась в результате неточности изготовления ГРС, нетрудно исправить. Для этого следует изменить первоначальный угол падения входного оптического пучка $\Theta_{\min} = 31,35^\circ$. На другой угол падения $\Theta = 36,81^\circ$. В результате, после изменения угла падения входного пучка мы получаем расчетную кривую зависимости коэффициента передачи от длины волны, которая фактически повторяет кривую 1 на рис. 4а. Таким образом, при глубине ГРС, равной $H_p = 3,2$ мкм после перестройки схемы, т. е. после установки нового угла падения $\Theta = 36,81^\circ$, расчётная зависимость коэффициента передачи от длины волны смещается по оси длин волн, и она практически полностью совпадает с зависимостью, рассчитанной при сочетании параметров: $\Theta_{\min} = 31,35^\circ$ и $H_p = 3$ мкм.

Применяя тот же самый профиль с глубиной $H_p = 3$ мкм можно построить другой фильтр, который будет подавлять излучения $\lambda_2 = 0,514$ мкм и обеспечивать максимальный коэффициент передачи на длине волны $\lambda_1 = 0,488$ мкм. На рис. 4б представлены расчетные характеристики коэффициента передачи фильтра, который выполняет эту функцию. Параметры фильтра



Параметры расчёта: График 1: $H_p = 3$ мкм, $\Theta_{\min} = 31,35^\circ$. График 2: $H_p = 3,2$ мкм, $\Theta_{\min} = 31,35^\circ$. График 3: $H_p = 3$ мкм, $\Theta_{\min} = 31,53^\circ$
 Рис 4. Зависимости коэффициентов передачи фильтров, построенных с применением ГРС, от длины волны излучения

следующие: $H_p = 3$ мкм, $\Theta_{\min} = 31,35^\circ$, при этом расчётный коэффициент передачи фильтра на длине волны $\lambda = 0,514$ мкм будет равен нулю, а расчётный коэффициент передачи на длине волны $\lambda = 0,488$ мкм будет близок к 100 % ($k_p = 0,999$). Эффект изменения характеристики фильтра достигнут только за счет изменения угла падения входного пучка.

Кратко опишем конструкцию фильтра, построенного по схеме, изображённой на рис. 1. Глубина рельефной структуры $H = 3$ мкм, при этом допустима погрешность порядка 5–10 %. При выборе периода ГРС следует принимать в расчёт условия: $\Lambda_p \gg \lambda$, и $D_{\Pi} > (2...3)\Lambda_p$, где D_{Π} — диаметр пучка. Выбор периода ГРС не влияет на частотные характеристики фильтра, но влияет на общие габариты устройства. Если выбрать, например, $\Lambda_p = 50$ мкм, то при диаметре лазерного пучка $D_{\Pi} = 1$ мм величина расстояния до диафрагмы L_{Φ} составит порядка 200–300 мм. При увеличении периода ГРС расстояние L_{Φ} будет возрастать.

Рельеф может быть изготовлен на подложке из стекла методом химического травления поверхности подложки через маску из фоторезиста, а затем рельеф следует покрыть отражающей плёнкой из серебра или алюминия. Установка расчётного угла падения осуществляется за счёт поворота платформы 3 с реально достижимой точностью, а затем угол падения может

быть скорректирован с помощью механизма точной настройки по критерию минимальной мощности излучения на выходе устройства на выбранной длине волны (например: $\lambda_1 = 0,488$ мкм).

Заключение

Фильтры, построенные на основе ГРС, могут быть изготовлены как для видимого, так и для инфракрасного диапазона длин волн. При этом технология их изготовления достаточно проста, а материалы для их изготовления — самые обычные: стекло, металлы. Рельефная структура может быть сформирована не только на поверхности стекла, но и на поверхности таких металлов, как алюминий, медь, серебро. В частности, ГРС на поверхностях металлов хорошо подходят для изготовления фильтров для различных областей инфракрасного диапазона излучения. Фильтры этого типа имеют гладкие зависимости коэффициента передачи мощности от длины волны. Величина эффективного коэффициента передачи мощности изменяется от нуля до единицы. Интересной для практики особенностью фильтра данного типа является возможность перестройки частотной характеристики в широких пределах путём изменения угла падения входного пучка излучения.

Проведенные научные исследования выполнены при поддержке программы 5–100.

Список источников

- [1] **Комоцкий, В. А.** Оптоэлектронные дифракционные датчики малых линейных перемещений / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов, В. И. Корольков // Фотоника. — 2011. — Том 25. — № 1. — С. 16–19.
- [2] **Комоцкий, В. А.** Исследование оптоэлектронного датчика угловых смещений и колебаний на основе глубокой отражательной фазовой дифракционной решетки / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов, А. Н. Алексеев, Е. В. Басистый // Вестник РУДН. — 2009. — № 4. — С. 95–101.
- [3] Энциклопедия по машиностроению XXL / URL: <http://mash-xxl.info>.

Filtration of optical spectrum with application deep periodic relief reflective structure

V. A. Komotskii, Y. M. Sokolov, N. V. Suetin

The Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

An optical scheme intended for filtering the wavelength spectrum of an optical signal is proposed and investigated. The filter scheme uses a relief reflecting periodic diffraction structure with a relief depth of more than half the wavelength. The input optical beam is directed to the diffraction structure at an angle. The plane of incidence is parallel to the lines of the diffraction structure. A zero-order beam of diffraction is output. The dependence of the power transfer coefficient from the input to the output on the wavelength of the emission has zeros and maxima at certain wavelengths. The transmission coefficient at maxima is close to unity. The filter can be configured to completely suppress any selected wavelength and is easily reconfigured by changing the angle of incidence of the input beam. A technique for calculating filter parameters is described. Examples of calculation of a filter for suppressing one of the spectral emission lines of an argon laser are given, provided that another strong spectral line is passed. The filter is equally simple for practical implementation in both the visible and infrared ranges.

Keywords: Optical spectral filter, Deep diffraction periodic structure, Optical signal filter, Spatial filter.