
**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ**

УДК 535.421

**ФИЛЬТР ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА С ПРИМЕНЕНИЕМ
ГЛУБОКОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ
РЕЛЬЕФНОЙ СТРУКТУРЫ**
© 2020 г. В. А. Комоцкий^а, Ю. М. Соколов^{а, *}, Н. В. Суетин^а^аРоссийский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6,
Москва, 117198 Российская Федерация

*E-mail: sokolov_yuri@mail.ru

Поступила в редакцию 09.07.2018 г.

После доработки 09.07.2018 г.

Принята к публикации 25.08.2018 г.

Предложена схема фильтра нового типа с применением рельефной отражающей периодической дифракционной структуры с глубиной рельефа более половины оптической длины волны. Исследованы зависимости коэффициента передачи мощности с входа на выход схемы от длины волны излучения. Показано, что фильтр может быть настроен на полное подавление излучения с любой выбранной длиной волны, при этом его спектральная характеристика может быть перестроена за счет изменения угла падения входного пучка. Приведены методика и примеры расчета фильтра для подавления одной из спектральных линий излучения при условии пропускания другой спектральной линии. Отмечено, что фильтр одинаково прост для практической реализации как в видимом, так и инфракрасном диапазоне.

DOI: 10.31857/S0033849420020114

ВВЕДЕНИЕ

В рассматриваемом здесь оптическом фильтре применена дифракционная схема, в которой используется специфическая, отражающая излучение глубокая периодическая рельефная дифракционная структура (ГРС) с прямоугольным профилем, имеющая форму типа “меандр”. Особенность этой формы состоит в том, что протяженность выступа рельефа равна протяженности его впадины. Термином “глубокая отражающая рельефная структура” мы называем такую структуру, глубина рельефа которой H_p превышает половину длины волны излучения λ в заданном диапазоне длин волн. Период рельефной структуры Λ_p должен удовлетворять условию, при котором дифракционные порядки хорошо разделяются: $\Lambda_p \gg \lambda$. Особенность схемы этого фильтра состоит в том, что выходной оптический сигнал получаем в нулевом порядке после дифракции отраженного от ГРС оптического пучка, при этом первый и высшие порядки дифракции не используем.

Ранее в электронной Энциклопедии по машиностроению (URL: <http://mash-xxl.info/info/172598/>) было описано применение периодических прозрачных рельефных структур с прямоугольным профилем в качестве спектральных фильтров. Однако эти фильтры не допускают перестройки частотных характеристик. Фильтр, построенный на основе отражающей периодической структу-

ры, в отличие от фильтра, описанного в Энциклопедии, допускает перестройку его частотной характеристики за счет изменения угла падения на ГРС входного излучения.

Особенности дифракции лазерного излучения на глубоких отражающих периодических структурах с прямоугольным профилем типа “меандр” были описаны нами ранее в статьях [1–4], где они применялись в высокочувствительных оптоэлектронных датчиках угловых колебаний поверхностей, а также для построения модуляторов лазерного излучения.

В спектральном фильтре, построенном с применением ГРС, можно выбрать угол падения оптического пучка и глубину рельефа так, чтобы получить нулевой коэффициент передачи мощности излучения с входа на выход на выбранной длине волны λ_1 и, вместе с тем, высокий коэффициент передачи мощности, близкий к 100%, на другой заданной длине волны λ_2 . Фильтры на основе ГРС могут быть построены как для видимого, так и для инфракрасного диапазонов излучения.

В экспериментах, описанных в [1–4], рельефные структуры были изготовлены методом химического травления поверхности стекла через маску из фоторезиста. Затем на поверхность рельефа напыляли пленку металла (алюминия) с высоким коэффициентом отражения для достижения высокой эффективности устройств. Возможен также вариант конструкции ГРС, в котором рельеф

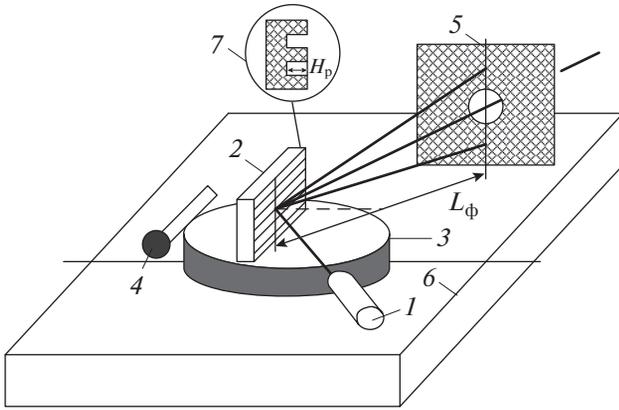


Рис. 1. Схема фильтра с применением ГРС: 1 – источник излучения, 2 – ГРС, 3 – поворотная платформа для регулировки угла падения входного пучка, 4 – механизм поворота платформы, 5 – пространственный фильтр, 6 – основание, 7 – форма профиля ГРС.

изготовлен на поверхности пластины из металла с высоким коэффициентом отражения излучения, и тогда покрытие поверхности отражающей пленкой не требуется.

1. СХЕМА ФИЛЬТРА. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Схема прохождения оптического пучка через фильтр, построенный на основе ГРС, представлена на рис. 1. Входной пучок излучения направлен под углом падения Θ на ГРС с глубиной H_p . Плоскость падения параллельна линиям рельефа ГРС. В результате отражения от ГРС волновой фронт оптической волны получает периодическую пространственную фазовую модуляцию (ПФМ) с прямоугольной формой типа “меандр”.

Глубину ПФМ, полученную в результате отражения оптической волны от ГРС, можно выразить формулой: $\Delta\Phi = (4\pi/\lambda) H_p \cos \Theta$. Как видно, она уменьшается при увеличении угла падения Θ . Амплитуда (модуляция) ПФМ волнового фронта Φ_m равна половине глубины ПФМ: $\Phi_m = \Delta\Phi/2$ и выражается следующей формулой [2, 3, 5]:

$$\Phi_m = \frac{2\pi}{\lambda} H_p \cos \Theta. \quad (1)$$

После отражения от ГРС излучение распадается на дифракционные порядки. 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 [2, 3]:

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

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

Изменение мощности излучения в нулевом порядке при изменении угла падения Θ сопровождается также изменениями мощностей в первом и в высших порядках дифракции, которые происходят в противофазе по отношению к изменению мощности в нулевом порядке дифракции. В частности, в первом порядке дифракции зависимость мощности излучения от угла падения Θ определяется соотношением [2]:

$$P_1 = P_{\text{вх}} R \frac{4}{\pi^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} H_p \cos \Theta \right). \quad (3)$$

Наибольший интерес для практических приложений представляет нулевой порядок дифракции, что обусловлено более высокой эффективностью передачи излучения с входа на выход фильтра по сравнению с вариантом, в котором мы использовали бы первый порядок дифракции. Излучение нулевого порядка дифракции выделяем 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:

$$L_\phi > k_3 \frac{D_n \Lambda_p}{\lambda}, \quad (4)$$

где D_n – диаметр оптического пучка, а k_3 – коэффициент запаса, величина которого составляет 2...3.

Как следует из формулы (2), мощность излучения в нулевом порядке дифракции зависит от глубины рельефа, от длины волны излучения и от угла падения пучка излучения на ГРС. Зависимости выходной мощности излучения в нулевом порядке дифракции от угла падения светового пучка на поверхность ГРС приведены на рис. 2а, 2б. Мощность излучения в нулевом дифракционном порядке изменяется в диапазоне от нулевой величины $P_0 = 0$ до максимальной величины: $P_0^{\text{max}} = P_{\text{вх}} R = P_{\text{эфф}}$.

Из формулы (2) следует, что максимумы зависимости $P_0(H_p, \Theta, \lambda)$ соответствуют условию

$$\cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} H_p \cos \Theta \right) = 1,$$

которое выполняется, если $4\pi(H_p/\lambda) \cos \Theta = 2k\pi$. Из этого следует, что максимумы мощности отраженного излучения в нулевом порядке дифракции наблюдаются при следующих углах падения:

$$\Theta_{\text{max}}^k = \arccos(k\lambda/2H_p), \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

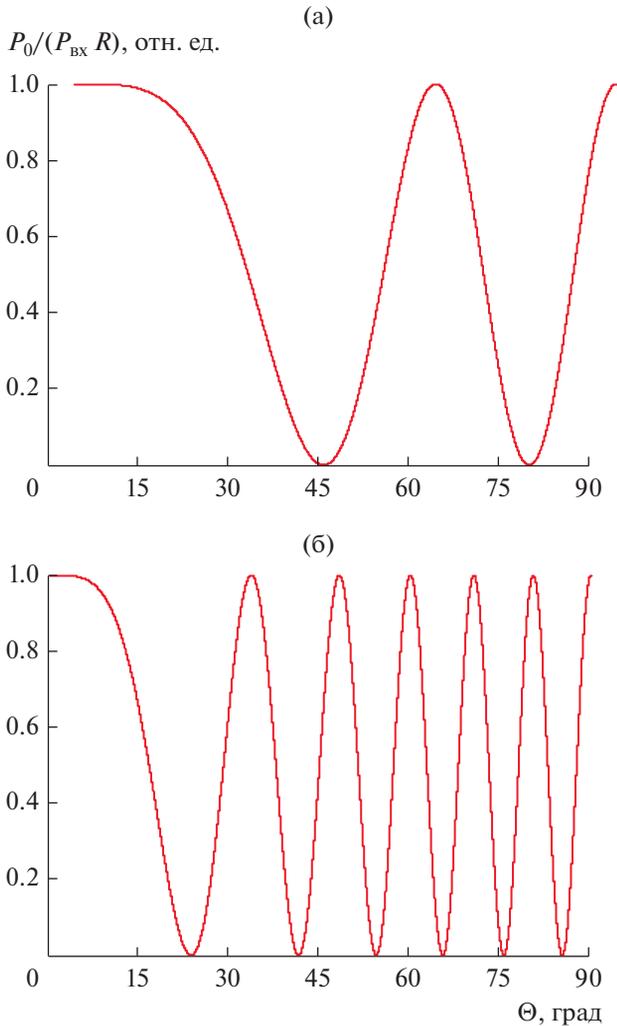


Рис. 2. Расчетные нормированные зависимости $P_0(\Theta)$ для двух значений глубины решетки: $H_p = \lambda$ (а) и $H_p = 3\lambda$ (б).

Значению $k = 0$ соответствует угол падения $\Theta = 90^\circ$, что физически нереально. Из формулы (2) также следует, что минимумы зависимости $P_0(H_p, \Theta, \lambda)$ соответствуют условию

$$\cos(4\pi(H_p/\lambda) \cos \Theta) = -1,$$

которое выполняется, если $4\pi(H_p/\lambda) \cos \Theta = (2n + 1)\pi$, и что минимумы мощности отраженного излучения в нулевом порядке дифракции наблюдаются при следующих углах падения:

$$\Theta_{\min}^n = \arccos\left(\frac{(2n + 1)\lambda}{4H_p}\right) = \arccos\left(\frac{(2n + 1)}{4\gamma}\right), \quad (6)$$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Число минимумов на кривых зависит от отношения $\gamma = (H_p/\lambda)$. При глубине $H_p = \lambda$ это отношение равно 2 (см. рис. 2а), а на глубине $H_p = 3\lambda$,

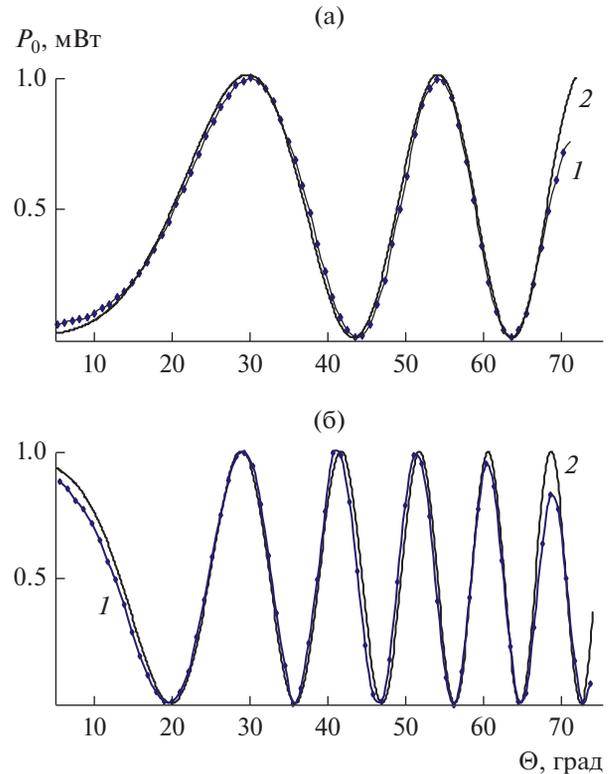


Рис. 3. Экспериментальные (1) и расчетные (2) зависимости $P_0(\Theta)$ для рельефных отражающих решеток с периодом $\Lambda_p = 100$ мкм при глубине $H_p = 1.74\lambda$ (а) и $H_p = 3.97\lambda$ (б). Каждый график нормирован на максимальное значение мощности в пучке нулевого порядка.

оно равно 6 (см. рис. 2б). Заметим, что отсчет номеров k и n начинается от углов, наиболее близких к углу $\Theta = 90^\circ$.

Экспериментальные зависимости нормированной мощности излучения нулевого порядка дифракции от угла падения излучения на ГРС, приведенные на рис. 3, с высокой степенью точности совпадают с расчетными кривыми. Это подтверждает правомерность применения в дальнейших расчетах формул (2), (5), (6).

Глубины ГРС экспериментальных образцов не были кратными целому числу длин волн, поэтому на рис. 3а, 3б в области углов падения, близких к нулю, нормированная мощность излучения нулевого порядка принимала разные начальные значения в интервале от нуля до единицы.

2. РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРОВ

2.1. Режекторные фильтры

Сначала рассмотрим наиболее простые фильтры, подавляющие излучение определенных длин волн. Зададим некоторую глубину рельефа H_p ,

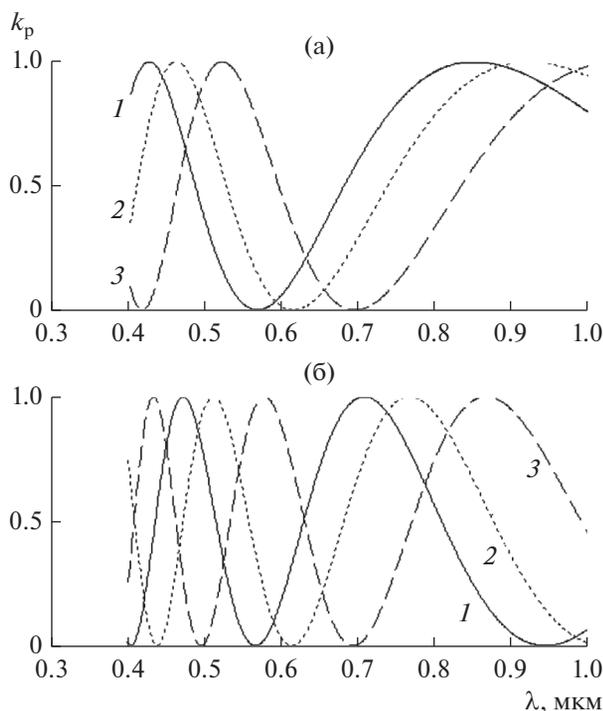


Рис. 4. Расчетные зависимости нормированного коэффициента передачи фильтра k_p от длины волны падающего излучения при глубине ГРС $H_p = 0.6$ (а) и 1 мкм (б) и при различных углах падения: $\Theta_{\text{вх}} = 45$ (1), 40 (2) и 30 град (3).

установим и зафиксируем в качестве параметра угол падения входного пучка $\Theta_{\text{вх}}$. Выходным пучком излучения фильтра считаем пучок нулевого порядка дифракции, который выделен пространственным фильтром. Тогда зависимость коэффициента передачи мощности излучения k_p с входа устройства на его выход от длины волны излучения λ будет выражена соотношением, которое следует из (2):

$$k_p = \frac{P_0}{P_{\text{вх}} R} = \cos^2 \left(2\pi \frac{H_p}{\lambda} \cos \Theta_{\text{вх}} \right). \quad (7)$$

На рис. 4а приведено семейство расчетных зависимостей $k_p(\lambda)$ при условии, что глубина рельефной структуры невелика и равна $H_p = 0.6$ мкм, и при различных значениях угла падения $\Theta_{\text{вх}}$ светового пучка на рельефную структуру.

График, приведенный на рис. 4а, демонстрирует возможность перестройки частот максимума и минимума коэффициента пропускания за счет изменения угла падения входного оптического пучка. При различных углах падения нулевые коэффициенты передачи фильтра соответствуют различным длинам волн оптического сигнала.

На рис. 4б приведено аналогичное семейство зависимостей $k_p(\lambda)$ при условии, что глубина ре-

льефной структуры равна $H_p = 1$ мкм. При сравнении графиков, приведенных на рис. 4а и 4б, видно, что при увеличении глубины рельефной структуры величины расстояний между максимумами и минимумами кривых на оси длин волн уменьшаются.

Координаты минимумов на оси длин волн можно рассчитать по формуле

$$\lambda_{\text{мин}}^n = \frac{4H_p}{(2n+1)} \cos \Theta_{\text{вх}}. \quad (8)$$

Как следует из анализа формулы (8) и из графиков, приведенных на рис. 3, фильтр на основе ГРС можно настроить на подавление излучения с любой длиной волны в широком диапазоне. При этом если излучение с некоторой длиной волны подавлено и не проходит на выход в нулевом порядке дифракции, то оно проходит в первые и в высшие порядки дифракции.

2.2. Разделяющие фильтры

Рассмотрим следующий пример построения фильтра, предназначенного для разделения двух линий в спектре излучения. Положим, что необходимо выделить излучение спектральной линии аргонового лазера, которая имеет длину волны $\lambda_2 = 0.514$ мкм, и вместе с тем подавить излучение другой спектральной линии аргонового лазера с длиной волны $\lambda_1 = 0.488$ мкм. При этом коэффициент передачи мощности излучения с входа на выход фильтра на длине волны $\lambda_{\text{max}} = \lambda_2 = 0.514$ мкм должен быть максимальным, k_p^{max} , близким к единице, а коэффициент передачи мощности на длине волны $\lambda_1 = 0.488$ мкм = $\lambda_{\text{мин}}$ должен быть минимальным, $k_p^{\text{мин}}$, близким к нулю. Рассмотрим некоторые соотношения, используя которые можно приблизительно оценить необходимую глубину рельефной структуры. Рассчитаем отношение длин волн, соответствующих максимальному и минимальному значениям коэффициента передачи мощности излучения с входа на выход устройства, оно составит: $\lambda_2/\lambda_1 = 0.514/0.488 = 1.0532$.

Далее из формул (5) и (6) определим соотношение длин волн, соответствующих максимальному и минимальному коэффициентам передачи устройства с учетом условия, что угол падения в этих формулах будет один и тот же. Приравняв углы падения в формулах (5) и (6), получим

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

Отсюда получаем соотношение, полезное для дальнейших оценок

$$\beta = \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{мин}}} = \frac{(1+2n)}{2k}. \quad (9)$$

Можно рассматривать разные варианты: $k \neq n$ или $k = n$. Если положить $k = n$, то соотношение (9) примет вид $\beta = \lambda_{\max}/\lambda_{\min} = (1 + 2n)/2n$. Из этого следует, что при $n = 11$ или $n = 10$ отношение β составит соответственно

$$\beta = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = \frac{23}{22} = 1.045$$

$$\text{или } \beta = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = \frac{21}{20} = 1.05,$$

что очень близко к ранее рассчитанному отношению $\lambda_2/\lambda_1 = 1.0532$, полученному для заданных выше длин волн линий аргонового лазера. С учетом этих условий определим подходящую глубину рельефа H_p , для чего найдем связь между величиной H_p и числом n . Аргумент функции в формуле (6) не может быть больше единицы, следовательно, должно выполняться условие

$$(2n + 1)/4\gamma \leq 1.$$

Отсюда следует, что число γ должно удовлетворять следующему условию:

$$\gamma \geq (2n + 1)/4. \quad (10)$$

При этом, если принять, что $n = 10$, то из условия (10) следует, что величина будет $\gamma \geq 5.25$, а при $n = 11$ – величина $\gamma \geq 5.75$. Исходя из этих условий можно выбрать значение параметра $\gamma = (H_p/\lambda) = 6$. С учетом этого глубина рельефа должна составлять порядка шести длин волн. На практике для построения фильтра можно выбрать глубину рельефа равной $H_p = 3$ мкм, а число $n = 10$. При этих условиях найдем 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 (6) расчетное значение угла падения: $\Theta_{\min} = 31.35^\circ$. При этом же значении угла падения расчет по формуле (7) величины коэффициента передачи мощности фильтра на длине волны $\lambda_2 = 0.514$ мкм дает результат $k_p = 0.998$, что близко к 1 и вполне соответствует поставленной задаче. Зависимость коэффициента передачи мощности фильтра от длины волны излучения в диапазоне длин волн от 0.44 до 0.6 мкм, рассчитанная при значениях параметров: $\Theta = 31.35^\circ$, $H_p = 3$ мкм, приведена на рис. 5а (кривая 1). Один из нулей этой зависимости точно соответствует длине волны 0.488 мкм.

Далее рассмотрим, как влияет неточность глубины рельефа на параметры фильтра. Допустим, что в результате ошибок при изготовлении глубина ГРС составила 3.2 мкм вместо расчетной глубины 3 мкм. Положим, что угол падения остается при этом неизменным, равным $\Theta = 31.35^\circ$. В этом случае кривая зависимости коэффициента передачи от длины волны (см. рис. 5а, кривая 2) значи-

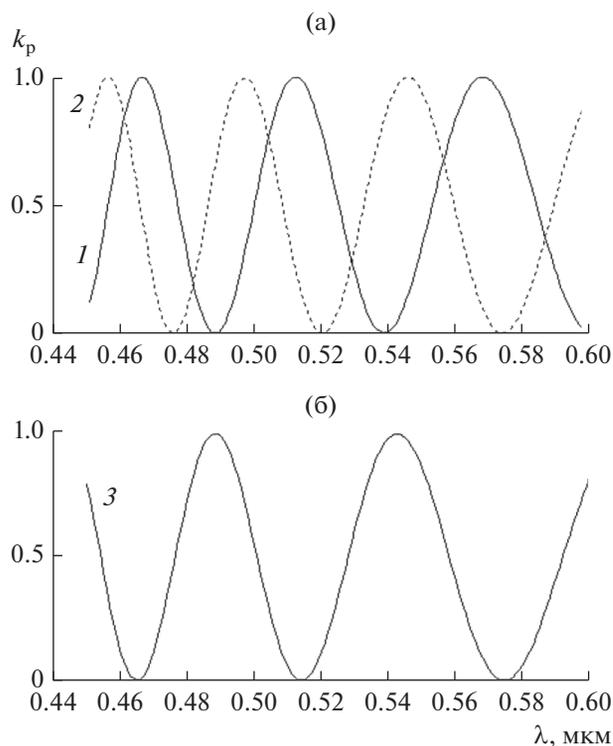


Рис. 5. Зависимости коэффициентов передачи фильтров k_p , построенных с применением ГРС, от длины волны излучения при различных параметрах расчета: а) $H_p = 3$ мкм, $\Theta_{\text{вх}} = 31.35^\circ$ (кривая 1), $H_p = 3.2$ мкм, $\Theta_{\text{вх}} = 31.35^\circ$ (кривая 2); б) $H_p = 3$ мкм, $\Theta_{\text{вх}} = 35.53^\circ$ (кривая 3).

тельно смещена по оси длин волн по отношению к кривой 1. Минимумы коэффициента передачи этой зависимости, ближайšie к заданной длине волны минимума 0.488 мкм, находятся на следующих длинах волн: $\lambda_{\min}^{10} = 0.52$ мкм и $\lambda_{\min}^{11} = 0.475$ мкм для $n = 10$ и $n = 11$ соответственно.

Вместе с тем расчеты показывают, что погрешность настройки фильтра, которая образовалась в результате неточности изготовления ГРС, нетрудно исправить. Для этого следует изменить первоначальный угол падения входного оптического пучка $\Theta = 31.35^\circ$ на другой угол падения, $\Theta_{\text{вх}} = 36.81^\circ$. В результате после изменения угла падения входного пучка на $\Theta_{\text{вх}} = 36.81^\circ$ получаем кривую зависимости коэффициента передачи от длины волны, которая фактически повторяет кривую 1 на рис. 5а. Таким образом, при глубине ГРС, равной $H_p = 3.2$ мкм после перестройки схемы, т.е. после установки нового угла падения $\Theta_{\text{вх}} = 36.81^\circ$, расчетная зависимость коэффициента передачи от длины волны смещается по оси длин волн, и она практически полностью совпадает с зависимостью, рассчи-

танной при сочетании параметров: $\Theta = 31.35^\circ$ и $H_p = 3$ мкм.

Дополнительно рассмотрим еще один вариант построения фильтра. Положим, что поставлена задача, обратная предыдущей: подавить излучение с длиной волны $\lambda_2 = 0.514$ мкм и при этом обеспечить максимально возможный коэффициент передачи на длине волны $\lambda_1 = 0.488$ мкм. Расчетное отношение длин волн, соответствующих максимуму и минимуму коэффициента пропускания фильтра в этом случае равно: $\lambda_1/\lambda_2 = 0.9494$. Найдем комбинации номеров n и k , при которых величина коэффициента $\beta = (2n + 1)/2k$ будет наиболее близка к расчетному значению $\lambda_1/\lambda_2 = 0.9494$. Если, например, принять вариант $n = 9$, $k = 10$, то получим отношение $\beta = (2n + 1)/2k = 19/20 = 0.95$, что близко к величине 0.9494. Применив формулу (6), получим следующие параметры фильтра. При прежней глубине ГРС, равной $H_p = 3$ мкм, для получения минимального коэффициента передачи на длине волны 0.514 мкм величина расчетного угла падения составит $\Theta_{вх} = 35.53^\circ$. При этом расчетный коэффициент передачи фильтра на длине волны 0.514 мкм будет равен нулю, а расчетный коэффициент передачи на длине волны 0.488 мкм будет близок к 100% ($k_p = 0.999$). График зависимости коэффициента передачи от длины волны при этих расчетных параметрах ($H_p = 3$ мкм, $\Theta_{вх} = 35.53^\circ$) приведен на рис. 5б. Из приведенных расчетов и графиков следует, что характеристику фильтра легко перестроить путем изменения угла падения входного пучка.

Отметим, что соотношение (9) накладывает определенные ограничения на характеристики фильтров данного типа. Можно настроить фильтр на подавление излучения, имеющего любую длину волны. Однако при этом длины волн, на которых достигается максимальный коэффициент передачи (близкий к 100%), не выбираются произвольно, а определяются с учетом соотношения (9).

Кратко опишем конструкцию фильтра, построенного по схеме, изображенной на рис. 1. Глубина рельефной структуры $H_p = 3$ мкм, при этом допустима погрешность порядка 5...10%. При выборе периода ГРС следует принимать в расчет ранее поставленные условия: $\Lambda_p \gg \lambda$, и $D_n > (2...3)\Lambda_p$. Выбор периода ГРС влияет на общие габариты устройства. Если выбрать, например, $\Lambda_p = 50$ мкм, то при диаметре лазерного пучка $D_n = 1$ мм и при $k_3 = 2$ величина расстояния L_Φ , рассчитанная по формуле (4), составит $L_\Phi \geq 200$ мм.

Технология изготовления ГРС не сложна. Рельеф может быть изготовлен на подложке из

стекла методом химического травления поверхности подложки через маску из фоторезиста, а затем рельеф следует покрыть отражающей пленкой из серебра или алюминия. 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. Установка расчетного угла падения осуществляется за счет поворота платформы 3 (см. рис. 1) 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фильтры, построенные на основе ГРС, могут быть изготовлены как для видимого, так и для инфракрасного диапазона длин волн. Технология их изготовления достаточно проста, а материалы для их изготовления – самые обычные: стекло, металлы. Фильтры этого типа имеют гладкие зависимости коэффициента передачи мощности от длины волны, при этом величина эффективного коэффициента передачи мощности изменяется в зависимости от длины волны излучения в диапазоне от нуля до единицы. Интересной для практики особенностью фильтра данного типа является то, что характеристику зависимости коэффициента передачи мощности от длины волны легко перестроить в широких пределах путем изменения угла падения входного пучка излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Проведенные научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки (программы 5-100).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Алексеев А.Н., Басистый Е.В.* // Вестник РУДН. 2009. № 4. С. 95.
2. *Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Басистый Е.В.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 2. С. 243.
3. *Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Басистый Е.В.* // РЭ. 2012. Т. 57. № 6. С. 1.
4. *Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Суетин Н.В.* Устройство для фильтрации спектров оптических сигналов. Патент на полезную модель № 181381 от 11.07.2018 // БИ. 2018. № 20.
5. *Комоцкий В.А.* Основы когерентной оптики и голографии. М.: РУДН, 2011.