

А.В. Тихонравов, Н.В. Гришина, С.А. Яншин

НОВЫЕ МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в области автоматизированного проектирования многослойных оптических покрытий и развития теоретических основ анализа и синтеза слоистых сред. Многие достижения нашли свое отражение в ряде монографий последних лет [1-5] и многочисленных журнальных публикациях. Вместе с тем в различных областях физики и механики, связанных с применением многослойных покрытий, постоянно возникают новые проблемы, для решения которых существующие методы оказываются недостаточно эффективными.

Перечислим ряд наиболее важных проблем такого рода:

- создание покрытий с заданными спектральными характеристиками в широких спектральных диапазонах;
- создание покрытий, предназначенных для работы в широком диапазоне углов падающего света, а также в сходящихся и расходящихся пучках;
- синтез покрытий с двумя одновременно заданными спектральными характеристиками (энергетическими коэффициентами отражения и пропускания);
- синтез покрытий с заданными энергетическими и фазовыми спектральными свойствами;
- синтез покрытий при жестких конструктивных ограничениях (малое число слоев и т.п.);
- разработка покрытий для устройств со сверхкороткими импульсами излучения (фемтосекундные лазеры).

В настоящей работе рассматривается ряд новых результатов, полученных при решении перечисленных выше проблем.

1. Синтез металлодиэлектрических покрытий

При создании широкополосных диэлектрических покрытий число слоев системы часто оказывается очень большим. Это затрудняет реализацию таких систем на практике и ухудшает качество получаемых покрытий из-за неизбежных ошибок в толщинах слоев при напылении. В случаях, когда требуемые спектральные характеристики покрытия должны иметь широкую область отражения, использование металлических прослоек позволяет значительно уменьшать число слоев в синтезируемых системах. Использование металлических прослоек становится также необходимым, когда требуется синтезировать системы с двумя заданными спектральными энергетическими характеристиками (или с заданным коэффициентом поглощения). Сложность синтеза металлодиэлектрических систем состоит в необходимости учитывать поглощение и дисперсионные свойства металлов. В работе [6] были представлены эффективные формулы расчета и описана программа синтеза многослойных оптических покрытий с учетом дисперсии и поглощения материалов. Изложенные в [6] результаты лежат в основе метода синтеза металлодиэлектрических покрытий с различными спектральными свойствами.

В качестве первого примера рассмотрим синтез широкополосного отрезающего фильтра, имеющего высокое отражение в области длин волн 0.6-1.0 мкм и низкое отражение в области 0.475-0.600 мкм. Оценочный функционал для этой задачи выбирался в виде

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (R(\lambda) - \hat{R}(\lambda))^2 d\lambda,$$

где

$$\lambda_1 = 0.475 \text{ мкм};$$

$$\lambda_2 = 1.0 \text{ мкм} - \text{граничные длины волн};$$

$$R(\lambda) - \text{коэффициент отражения системы};$$

$$\hat{R}(\lambda) = 1 \text{ в области длин волн } 0.6-1.0 \text{ мкм};$$

$$R(\lambda) = 0 \text{ для области длин волн } 0.475-0.600 \text{ мкм}.$$

По разработанной программе было синтезировано 3-слойное покрытие с прослойкой из меди. Первый и третий слои системы имеют показатель преломления 2.30, второй слой - медь, показатель преломления подложки 1.52. Для сравнения приведем результаты синтеза предназначенных для этой же цели диэлектрических покрытий с показателями преломления нечетных слоев $n_1 = 2.30$ и четных слоев - $n_2 = 1.45$ на той же подложке. На рис. 1 представлены коэффициенты отражения синтезированных систем: 3-слойной металлодиэлектрической (сплошная кривая), 11-слойной диэлектрической системы (штрихпунктирная кривая) и 15-слойной диэлектрической системы (штриховая кривая); прямыми линиями нанесена функция $R(\lambda)$. Трехслойная металлодиэлектрическая система по своим спектральным свойствам оказывается лучше 11-слойной диэлектрической системы, но несколько уступает

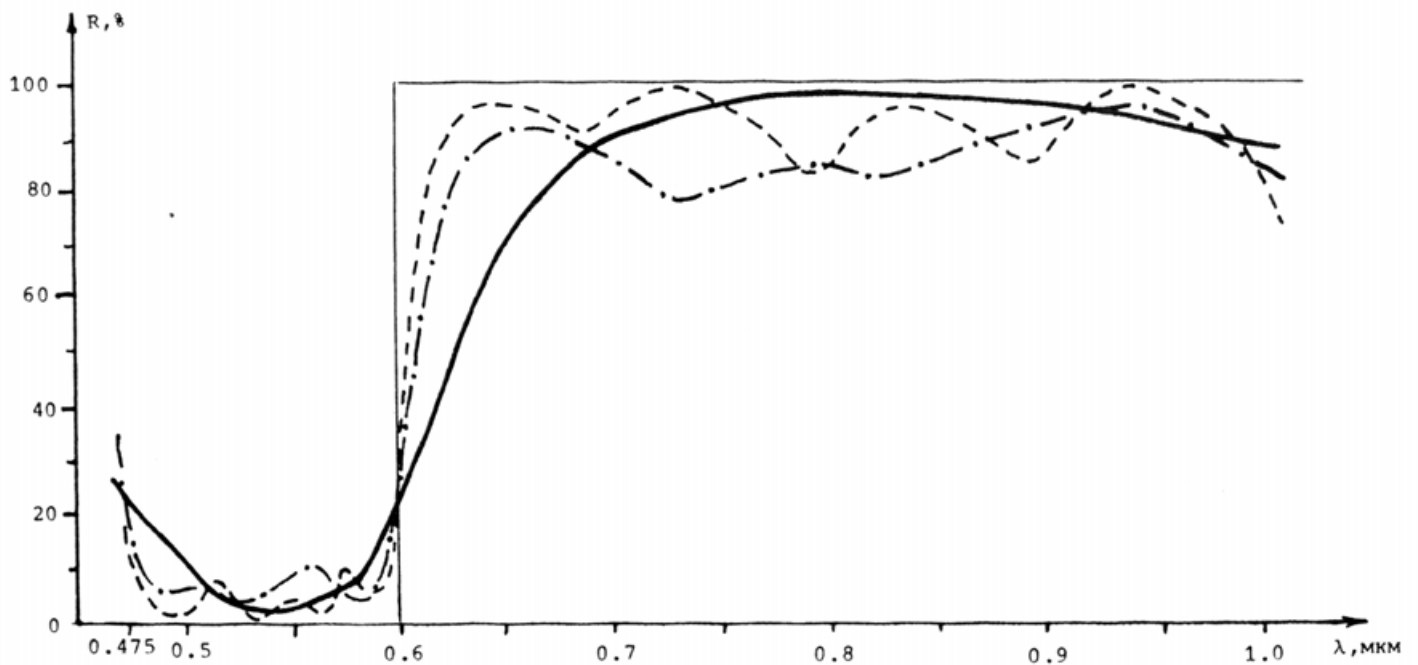


Рис. 1

15-слойной. Как мы видим, использование металлического слоя позволяет существенно упростить конструкцию и уменьшить требуемое число слоев системы в несколько раз.

В качестве второго примера рассмотрим синтез покрытия с низким коэффициентом отражения и коэффициентом пропускания порядка 10% в области длин волн 0.4-0.7 мкм. Для этого случая оценочный функционал был выбран в виде

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (T(\lambda) - 0.1)^2 d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R^2(\lambda) d\lambda,$$

где

$T(\lambda)$ и $R(\lambda)$ - энергетические коэффициенты пропускания и отражения системы;

$$\lambda_1 = 0.4 \text{ мкм};$$

$$\lambda_2 = 0.7 \text{ мкм}.$$

В качестве материала для металлических прослоек использовался никель. На рис. 2 представлены коэффициент отражения (кривая 1) и коэффициент пропускания (кривая 2) синтезированного 9-слойного покрытия. Диэлектрические слои имели показатели преломления $n_H = 2.0$ и $n_L = 1.45$, показатель преломления подложки $n_1 = 1.52$, порядок следования слоев от воздуха:

$$2(n_L/N_i)/n_H/n_L/n_H/N_i/n_H.$$

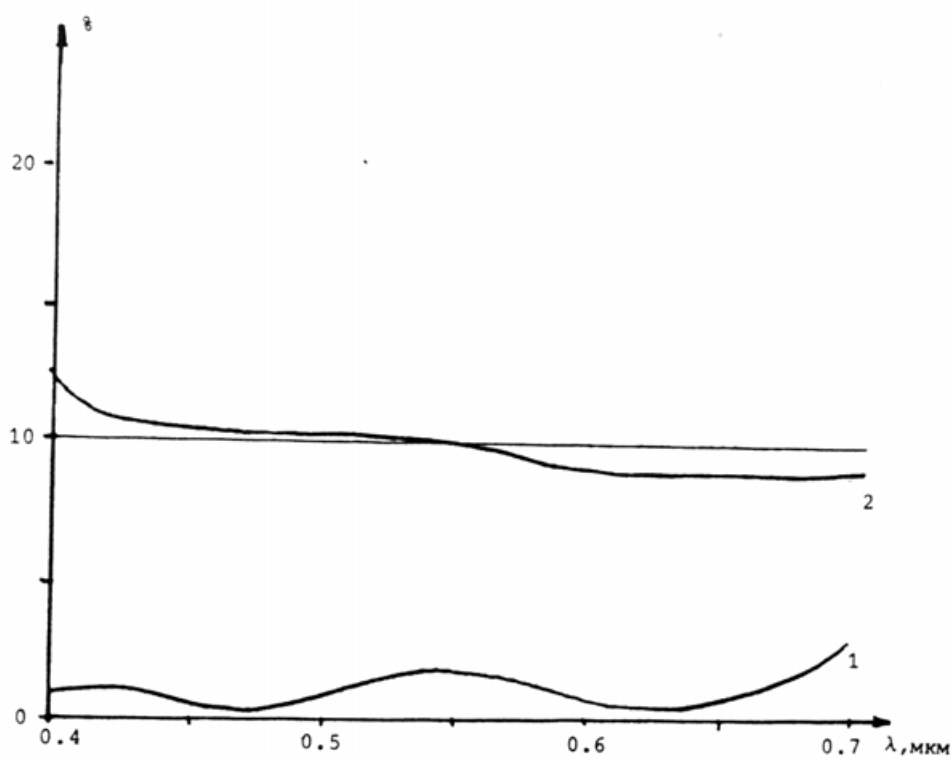


Рис. 2

2. Синтез зеркал с постоянной разностью фаз при наклонном падении света

Одной из задач, возникших в связи с развитием лазерной физики, является создание высокоотражающих зеркал для наклонного падения света с постоянной разностью фаз между S- и P-компонентами отраженного поля. Требования к синтезируемому покрытию могут быть учтены в этом случае с помощью оценочного функционала

$$F = \int_{k_1}^{k_2} v_S(k) (R_S(k) - 1)^2 dk + \int_{k_1}^{k_2} v_P(k) (R_P(k) - 1)^2 dk + \int_{k_1}^{k_2} v(k) (\varphi_S(k) - \varphi_P(k) - \Delta\varphi)^2 dk,$$

где

$k = 2\pi/\lambda$ - волновое число;

$[k_1, k_2]$ - спектральный интервал, в котором проводится синтез;

$v_S(k)$, $v_P(k)$ и $v(k)$ - весовые функции;

R_S , R_P - энергетические коэффициенты отражения;

φ_S , φ_P - фазы коэффициентов отражения для S- и P-компонент поля соответственно;

$\Delta\varphi$ - требуемая разность фаз.

Различные градиентные методы оказываются малоэффективными при синтезе систем с заданными фазовыми характеристиками. При их использовании уменьшение оценочного функционала не превышает, как правило, 10-15%.

Эти методы позволяют только немного подправить задаваемые начальные приближения толщин слоев. В таких случаях для получения хорошего начального приближения обычно предлагается использовать метод прямого перебора толщин слоев системы на заданных сетках значения. Но для получения достаточно хорошей системы эти сетки должны быть мелкими, порядка сотых долей четвертьволнового слоя. Высокоотражающие системы обладают большим числом слоев, поэтому перебор даже отдельной группы слоев требует громадных затрат машинного времени.

Другой возможностью является использование при синтезе необходимых условий оптимальности системы. Идея метода изложена в работах [7, 8]. Вкратце она состоит в следующем. Рассматривается система дифференциальных уравнений, описывающая распространение волны в среде, и сопряженная с ней система дифференциальных уравнений, которая позволяет выразить приращение оценочного функционала при игольчатом варьировании показателя преломления (изменении показателя преломления на величину Δn на некотором отрезке $[\zeta, \zeta + \Delta z]$) через решения этих дифференциальных систем. Аналитическое выражение для приращения оценочного функционала позволяет находить место, в котором изменение показателя преломления приводит к уменьшению функционала.

Выберем направление оси z от подложки к внешней среде. Обозначим 0 и z_0 - координаты границ покрытия с подложкой и внешней средой, n_1 и n_2 - показатели преломления чередующихся слоев, n_0 и \tilde{n}_1 - показатели преломления внешней среды и подложки. Подложка может быть поглощающей (например, металлической); в этом случае показатель преломления будет комплексным: $\tilde{n}_1 = n_1 + i\psi$. Амплитудный коэффициент отражения S-компоненты r_S удобно выразить через адмитанс X_S , а амплитудный коэффициент отражения P-компоненты r_P - через импеданс X_P :

$$r_{S,P} = \frac{v_{S,P} - X_{S,P}(k, z_0)}{v_{S,P} + X_{S,P}(k, z_0)},$$

где θ_0 - угол падения, $v_S = n_0 \cos \theta_0$, $v_P = \cos \theta_0 / n_0$.

Уравнения для X_S и X_P имеют вид

$$X'_S(z) = ik(X_S^2(z) + \alpha^2 - n^2(z)), \quad (1)$$

$$X'_P(z) = ik(n^2(z)X_P^2(z) - 1 + \frac{\alpha^2}{n^2(z)})$$

с $\alpha = n_0 \sin \theta_0$ и начальными условиями

$$X_S(0) = \tilde{n}_1 \cos \theta_1, \quad X_P(0) = \cos \theta_1 / \tilde{n}_1,$$

где θ_1 - угол распространения волны в подложке.

Энергетические коэффициенты отражения и фазы отраженных волн выражаются через амплитудные коэффициенты отражения по формулам

$$R_{S,P}(k) = |r_{S,P}(k)|^2, \quad \varphi_{S,P} = \arctg \frac{\text{Im} r_{S,P}(k)}{\text{Re} r_{S,P}(k)}.$$

Сопряженная система дифференциальных уравнений в нашем случае выглядит следующим образом:

$$\Psi'_{S,P}(z) = 2ikX_{S,P}^*(z)\Psi_{S,P}(z). \quad (2)$$

Начальные условия для уравнения (2) задаются при $z=z_0$ (сопряженная система решается от внешней среды к подложке). Выделим действительные и мнимые части $X_{S,P}$ и $\Psi_{S,P}$:

$$X_S = x_1 + ix_2, \quad X_P = x_3 + ix_4, \quad \Psi_S = \psi_1 + i\psi_2, \quad \Psi_P = \psi_2 + i\psi_4.$$

Начальные условия для системы (2) записываются в виде

$$\Psi_i(z_0) = - \left. \frac{\partial F}{\partial x_i} \right|_{z=z_0}, \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

При изменении на малом отрезке $[\zeta, \zeta + \Delta z]$ показателя преломления на величину Δn приращение функционала F будет равно

$$\Delta F = - P(\zeta) \Delta z \Delta u + o(\Delta z),$$

где

$$P(\zeta) = - \int_{k_1}^{k_2} k \text{Im} (\Psi_S + \frac{\alpha^2}{u^2} \Psi_P - (X_P^*)^2 \Psi_P) dk,$$

$$u = u^2, \quad \Delta u = (n + \Delta n)^2 - n^2.$$

Для двухкомпонентных покрытий величина $|\Delta u|$ постоянна:

$$|\Delta u| = |n_1^2 - n_2^2|.$$

В слоях с меньшим показателем преломления ($\Delta u > 0$) игольчатая вариация приводит к уменьшению функционала в тех точках, где $P(\zeta) > 0$, а в слоях с большим показателем преломления ($\Delta u < 0$) - в тех точках, где $P(\zeta) < 0$. При этом большее изменение функционала будет в точках с наибольшим по модулю значением $P(\zeta)$.

В процессе синтеза покрытия ищется решение систем (1) и (2), подсчитывается значение функции $P(z)$ и выбирается точка ζ , в которой изменение показателя преломления приводит к наибольшему уменьшению функционала F . Проведение игольчатой вариации во внутренней точке слоя эквивалентно замене этого слоя тремя, из которых два крайних слоя имеют старый показатель преломления, а средний слой толщины Δz - новый показатель преломления. Игольчатая вариация на границе слоев приводит к одновременному увеличению толщины одного слоя и уменьшению толщины другого без изменения общего числа слоев. Если вариация проводится на границе тонкого слоя ($d_j \leq \Delta z$), число слоев уменьшается.

Описанный вкратце метод позволяет эффективно решать задачу синтеза зеркал с постоянной разностью фаз. В качестве примера на рис. 3 приведены отклонения разности фаз от -90° при угле падения $\theta_0 = 45^\circ$ для трех синтезированных систем. Показатели преломления нечетных от подложки слоев брались равными 2.30, четных - 1.38, коэффициент отражения

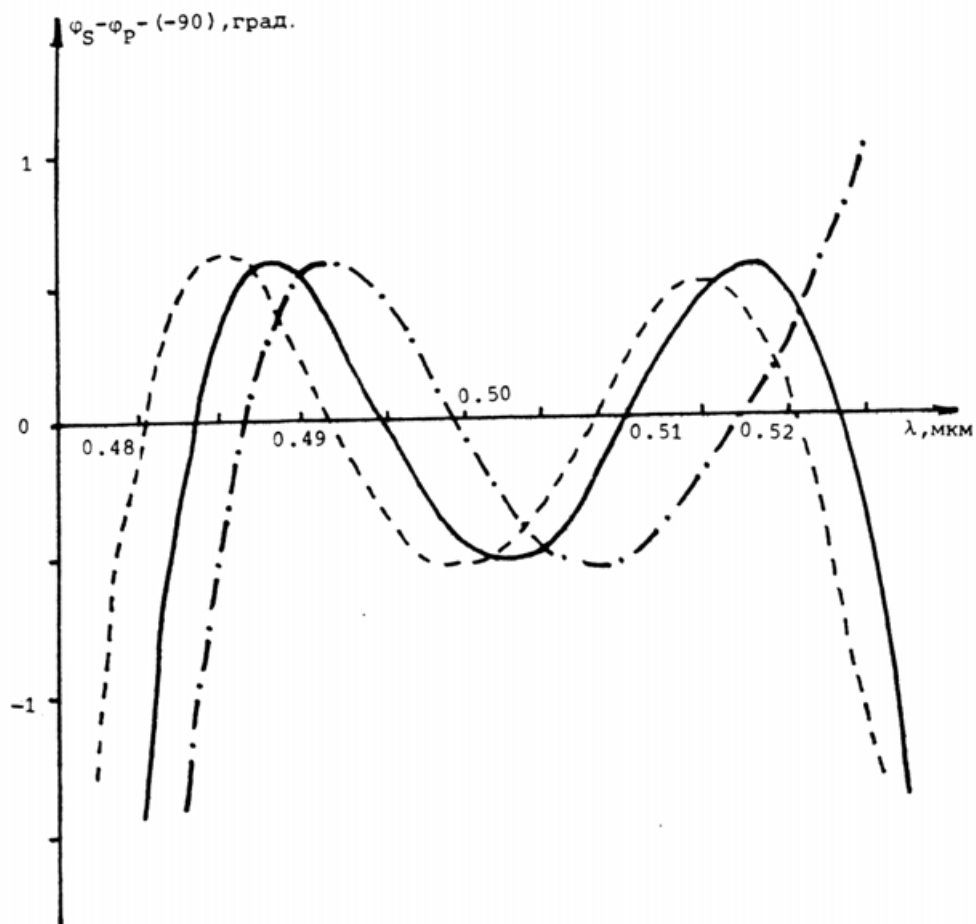


Рис. 3

S-компоненты для всех полученных систем $R_S \geq 99.9\%$. Первая система (кривая 1) имеет 34 слоя, показатель преломления подложки $n_1 = 1.52$, коэффициент отражения P-компоненты $R_P \geq 99.8\%$. Вторая система (кривая 2) имеет 31 слой, коэффициент отражения $R_P \geq 99.7\%$, подложка та же, что и у первой системы. Третья система синтезировалась на подложке из серебра ($\check{n}_1 = 0.05 + i2.87$); она имеет 22 слоя, коэффициент отражения P-компоненты $R_P \geq 99.5\%$.

3. Синтез оптических покрытий, обладающих спектральными характеристиками, близкими к заданным в диапазоне частот и углов

До настоящего времени развивались преимущественно методы синтеза оптических покрытий, работающих в диапазоне частот, при нормальном падении света либо при фиксированном угле падения излучения на покрытие. Более общей является задача синтеза оптических покрытий, обладающих заданными спектральными характеристиками не только в диапазоне частот, но и в угловом диапазоне.

В настоящем пункте описывается метод решения этой задачи. Рассматриваются непоглощающие покрытия. В качестве спектральных характеристик используются коэффициенты пропускания S-поляризованного света T_S , p-по-

ляризованного света T_P и неполяризованного света $\hat{T} = 1/2(T_S + T_P)$. Коэффициенты T , T_S , T_P являются функциями волнового числа k и угла падения θ .

В соответствии с возникающими на практике задачами рассматриваются три варианта постановки задачи синтеза.

1. Требуется получить покрытие с коэффициентом пропускания в неполяризованном свете, близким к функции $\hat{T}(k, \theta)$, заданной в спектральной полосе $[k_1, k_2]$ и диапазоне углов $[\theta_1, \theta_2]$.

2. То же в поляризованном свете (задается либо $\hat{T}_S(k, \theta)$, либо $\hat{T}_P(k, \theta)$).

3. Одновременно задаются две функции $\hat{T}_S(k, \theta)$ и $\hat{T}_P(k, \theta)$. Необходимо получить покрытие, у которого в спектральной полосе $[k_1, k_2]$ и в диапазоне углов $[\theta_1, \theta_2]$ коэффициент $\hat{T}_S(k, \theta)$ близок к $\hat{T}_S(k, \theta)$, а коэффициент $T_P(k, \theta)$ к $\hat{T}(k, \theta)$. Задача решается в вариационной постановке. Для оценки близости спектральных характеристик покрытия к требуемым выбираются функционалы вида

$$F = \int_{k_1}^{k_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} v(k, \theta) [T(k, \theta) - \hat{T}(k, \theta)]^2 d\theta dk, \quad (3)$$

при первом варианте постановки и

$$F = \beta \int_{k_1}^{k_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} v_S(k, \theta) [T_S(k, \theta) - \hat{T}_S(k, \theta)]^2 d\theta dk + \\ + (1-\beta) \int_{k_1}^{k_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} v_P(k, \theta) [T_P(k, \theta) - \hat{T}_P(k, \theta)]^2 d\theta dk \quad (4)$$

при втором ($\beta = 0$ или $\beta = 1$) и третьем ($0 < \beta < 1$) вариантах постановки.

Здесь v , v_S , v_P - весовые функции, позволяющие по-разному оценивать точность решения на разных участках спектра и диапазона углов.

Для функционалов (3) и (4) удается в явной аналитической форме выписать градиент и получить эффективный алгоритм их вычисления. Это позволяет использовать для минимизации оценочных функционалов методы градиентного типа и на их основе разработать универсальные методы синтеза оптических покрытий.

Для всех трех вариантов постановки задачи был написан пакет программ, предназначенный для синтеза двухкомпонентных оптических покрытий. Этот пакет программ весьма эффективен и позволяет проводить синтез в диапазоне частот и углов даже на миниЭВМ. Так, приведенное ниже в качестве примера просветляющее покрытие было синтезировано за 10 мин работы ЭВМ СМ-1420.

Требовалось получить просветляющее покрытие с $T \approx 1$ в видимой области спектра (400-700 нм), устойчивое к изменению угла падения излучения в диапазоне 35-55°. Показатель преломления внешней среды и подложки - 1.00 (воздух) и 1.52 (стекло); использовались слои с показателями пре-

ломления 1.45 и 2.00. В качестве начального приближения взято просветляющее покрытие, работающее при угле падения $\theta=45$. Заметим, что само по себе оно непригодно для работы при других углах падения, так как его коэффициент пропускания падает в данном диапазоне до 90%. Синтезированное просветляющее покрытие снижает коэффициент отражения до 1-2% практически во всем заданном диапазоне частот для всех углов падения света из заданного интервала ($35^\circ, 55^\circ$). Спектральные характеристики полученного покрытия представлены на рис. 4.

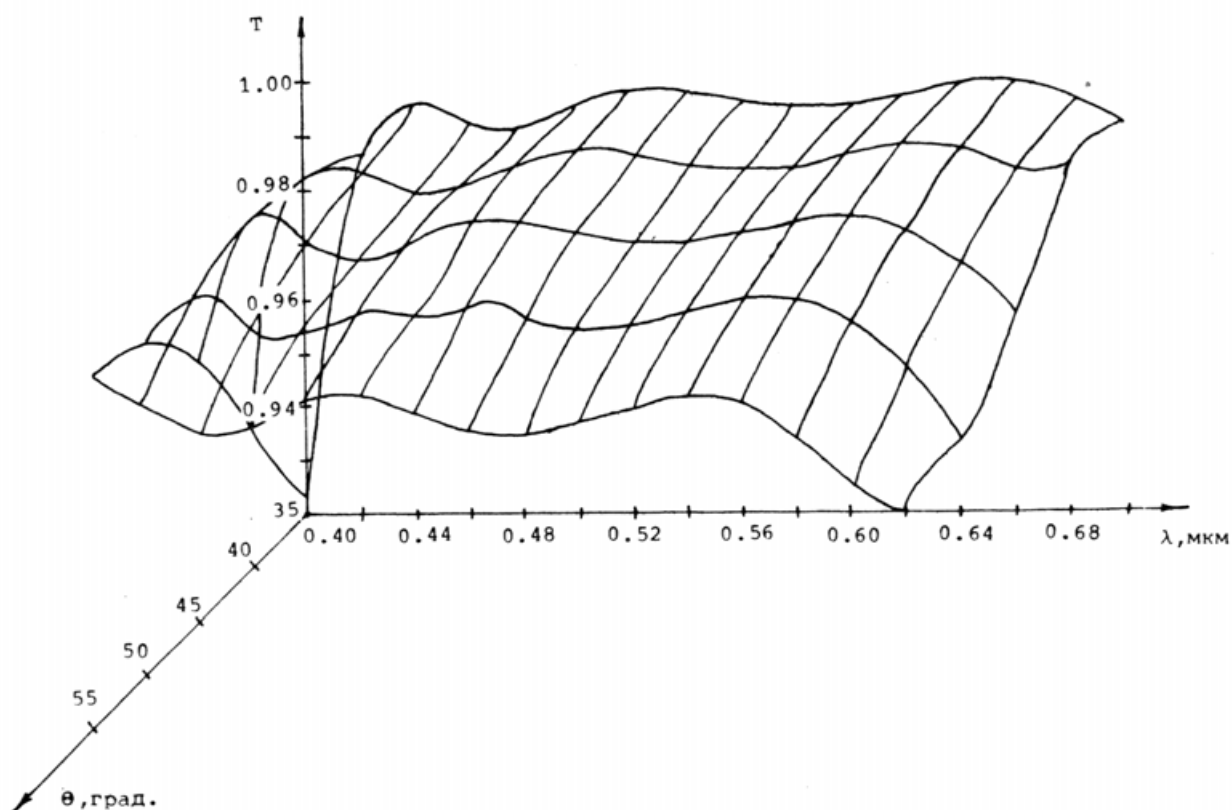


Рис. 4

Л и т е р а т у р а

1. L i d d e l Н.М. Computer-aided Techniques for the Design of Multilayer Filter. - Bristol, Hilger, 1981.
2. M a s l e o d Н.А. Thin film optical filters. - Bristol, Hilger, 1986.
3. Я к о в л е в П.П., М е ш к о в Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение, 1987.
4. Т и х о н р а в о в А.В. Синтез слоистых сред. М.: Знание. Сер. Математика, кибернетика, 1987, № 5.
5. Б а б е Г.Д., Г у с е в Е.Л. Математические методы оптимизации интерференционных фильтров. Новосибирск: Наука, 1987.

6. Г р и ш и н а Н.В., Т и х о н р а в о в А.В. Синтез многослойных оптических покрытий с учетом дисперсии и поглощения. - Вестник МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия, 1985, т. 26, № 1, с. 11-16.

7. Т и х о н р а в о в А.В. О методе синтеза оптических покрытий, использующем необходимые условия оптимальности. - Вестник МГУ. Сер. физика, астрономия, 1982, т. 23, № 6, с. 91-93.

8. Б а с к а к о в А.Н., Т и х о н р а в о в А.В. Синтез двухкомпонентных оптических покрытий. - Оптика и спектроскопия, 1984, т. 56, № 5, с. 915-919.
