

УДК 535.8

## СИНТЕЗ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ЗАДАНЫМИ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В ТРЕБУЕМОМ ДИАПАЗОНЕ УГЛОВ ПАДЕНИЯ

Н. В. Гришина

*(кафедра математики)*

Рассматривается синтез многослойных оптических покрытий с заданными спектральными характеристиками в требуемом диапазоне длин волн (или на одной длине волны), предназначенных для работы в широком диапазоне углов падения света. При синтезе используются градиентные методы оптимизации и метод игольчатых вариаций. Приведены примеры синтезированных систем: просветляющие покрытия, светоделители, узкополосный фильтр.

При решении ряда физических и технических проблем возникает необходимость проектирования (синтеза) многослойных оптических покрытий, обладающих заданными спектральными характеристиками не только при определенном угле падения света, но и в некотором диапазоне углов. Такие задачи возникают при работе со сходящимися или расходящимися пучками света или в тех случаях, когда сигнал может поступать под разными углами.

В данной работе рассматривается задача синтеза многослойных оптических покрытий, предназначенных для работы в диапазоне углов, с заданными спектральными характеристиками в требуемом диапазоне длин волн или на одной длине волны (для лазерных систем).

Будем рассматривать двухкомпонентные покрытия, т. е. покрытия, состоящие из слоев с двумя чередующимися показателями преломления. Такие покрытия являются наиболее технологичными. Кроме того, как показывает теоретический анализ [1, 2], в ряде случаев наиболее оптимальным оказывается выбор двух из всех используемых материалов: с максимальным и минимальным показателями преломления. Пусть  $\theta$  — угол падения излучения,  $\lambda$  — длина волны,  $n_i$  — показатель преломления подложки (в качестве внешней среды рассматривается воздух и показатель преломления берется равным 1,0),  $n_1, n_2$  — чередующиеся показатели преломления слоев,  $N$  — число слоев,  $d_1, d_2, \dots, d_N$  — толщины слоев (нумерация от подложки).

Введем функционал, оценивающий точность решения задачи синтеза покрытия с заданным коэффициентом пропускания неполяризованного света  $\hat{T}(\lambda, \theta)$  в диапазоне длин волн  $[\lambda_1, \lambda_2]$  и диапазоне углов  $[\theta_1, \theta_2]$ :

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} v(\lambda, \theta) [T(\lambda, \theta) - \hat{T}(\lambda, \theta)]^2 d\theta d\lambda. \quad (1)$$

Здесь  $T(\lambda, \theta)$  — коэффициент пропускания покрытия для неполяризованного света,  $v(\lambda, \theta)$  — весовая функция.

Для решения задачи развивается два подхода. Первый подход — минимизация оценочного функционала  $F$  — широко используется при решении задач синтеза покрытий при нормальном или наклонном падении света и может быть обобщен на случай синтеза покрытий, работающих в диапазоне углов. Задача синтеза рассматривается в вариационной постановке и сводится к минимизации оценочного функционала по толщинам слоев  $d_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) при фиксированном чис-

ле слоев  $N$  и при заданной последовательности материалов в покрытии (т. е. при заданных показателях преломления слоев). При этом, как правило, используются градиентные методы, так как для градиента оценочного функционала получаются простые аналитические выражения. Основная проблема, возникающая при этом, связана с многоэкстремальностью оценочного функционала и сложностью поиска подходящего локального экстремума в тех случаях, когда неизвестно хорошее начальное приближение параметров системы. При синтезе покрытий, работающих в диапазоне углов, структура функционала оказывается еще более сложной. Поиск подходящего локального экстремума часто оказывается достаточно сложной и трудоемкой задачей, которую не всегда удается решить. Во многих случаях в качестве начальных приближений можно взять полученные ранее системы, имеющие близкие спектральные характеристики при нормальном падении излучения или каком-либо угле падения, входящем в интересующий нас диапазон углов. Но получить с помощью оптимизации этих систем покрытия, обладающие требуемыми свойствами в диапазоне углов, удается не всегда.

Второй подход — так называемый метод игольчатых вариаций — основывается на необходимых условиях оптимальности системы [1]. Он успешно использовался при синтезе покрытий при нормальном [3] и наклонном падении света [4] и может быть развит на случай синтеза покрытий с заданными спектральными характеристиками в диапазоне углов. При этом, как правило, в качестве начальных приближений берутся однослойные покрытия, а в качестве параметров системы задаются два показателя преломления:  $n_1$ ,  $n_2$  и общая толщина покрытия  $z_0$ . Структура покрытия формируется в процессе проведения так называемых игольчатых вариаций показателя преломления системы. При проведении каждой игольчатой вариации значение показателя преломления изменяется на величину  $\Delta n$  на некотором участке толщины  $\Delta z$ , так, чтобы значение функционала уменьшилось. При синтезе двухкомпонентных покрытий  $\Delta n = |n_1 - n_2|$ . При проведении игольчатой вариации либо возникает новый слой толщины  $\Delta z$ , либо (при проведении игольчатой вариации на границе двух слоев) меняются толщины двух соседних слоев: толщина одного слоя уменьшается на  $\Delta z$ , а толщина другого слоя на столько же возрастает (при этом один из слоев может пропасть, а два соседних — слиться). Общая толщина покрытия в процессе проведения игольчатых вариаций не меняется, за исключением случаев проведения игольчатых вариаций на границах покрытия, а число слоев в общем случае меняется.

При первом подходе для минимизации функционала используется сочетание метода градиентного спуска и метода сопряженных градиентов. Формулы для расчета коэффициента пропускания  $T(\lambda, \theta)$  и производных коэффициента пропускания по толщинам слоев, входящих в градиент функционала, остаются теми же, что и при рассмотрении задачи синтеза при фиксированном угле падения света. Отличие данной задачи состоит в том, что нам придется рассматривать характеристики в диапазоне углов, и в выражения для функционала и градиента функционала войдет интеграл по углам падения  $\theta$ .

При использовании метода игольчатых вариаций структура программы и формулы для расчета импеданса, адмитанса и сопряженных функций будут такие же, как в работе [4], но в выражения для функционала  $F$  и для функции  $P(z)$ , определяющей место проведения игольчатой вариации, также войдет интеграл по углам падения.

Рассмотрим синтез широкополосного просветляющего покрытия,

предназначенного для работы в диапазоне углов падения  $0^\circ$ — $45^\circ$ . Такие покрытия необходимы для многих оптических (линзы, объективы и т. п.), спектральных и технических (приборные окна) устройств для уменьшения остаточного отражения. При синтезе градиентными методами просветляющего покрытия в видимом диапазоне спектра в качестве начальных приближений для параметров системы использовался ряд полученных ранее просветляющих покрытий при нормальном падении света и при угле падения  $45^\circ$  (для их получения также применялись градиентные методы и метод игольчатых вариаций). В качестве подложки здесь и везде в дальнейшем рассматривается стекло; показатель преломления подложки  $n_l=1,52$ . Наилучшие результаты были получены при оптимизации 6-слойного просветляющего покрытия, синтезированного для нормального падения света. Показатели преломления нечетных от подложки слоев  $n_1=2,3$ ; четных —  $n_2=1,4$ ; толщины слоев синтезированного покрытия от подложки в Å: 168, 356, 606, 149, 405, 1072 (толщины слоев начального приближения: 185, 337, 600, 172, 384, 1048 Å). На рис. 1, а приведены спектральные коэффициенты пропускания  $T(\lambda)$  полученного покрытия при различных углах

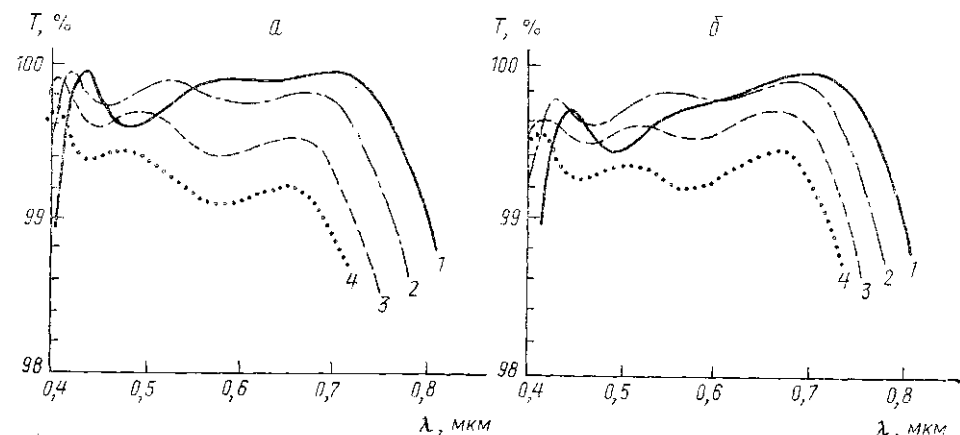


Рис. 1

падения света: нормальное падение (1), угол падения  $30^\circ$  (2),  $40^\circ$  (3) и  $45^\circ$  (4). Как видно, в диапазоне углов падения света  $0$ — $30^\circ$  покрытие обладает высоким пропусканием ( $T \geq 99\%$ ) практически во всей видимой области спектра, но при дальнейшем возрастании угла падения пропускание на длинноволновом конце падает.

Покрытие, просветляющее в более широком диапазоне углов, удалось получить методом игольчатых вариаций. Показатели преломления слоев выбирались такими же,  $n_1=2,3$ ;  $n_2=1,4$ . В качестве начальных приближений выбирались однослойные покрытия с различной общей толщиной покрытия. В процессе проведения игольчатых вариаций получались серии покрытий со все уменьшающимся значением функционала и в общем случае все возрастающим числом слоев. Лучшей оказалась 7-слойная система, которая была получена из однослойного покрытия с показателем преломления 2,3 и общей толщиной 2750 Å. Толщины слоев от подложки в Å: 152, 330, 994, 63, 234, 972, 14; прилегающий к подложке слой имеет показатель преломления  $n_1=2,3$ . На рис. 1, б приведены спектральные коэффициенты пропускания  $T(\lambda)$  этого покрытия при различных углах падения света: нормальное падение (1), угол падения  $30^\circ$  (2),  $40^\circ$  (3) и  $45^\circ$  (4). В ди-

апазоне углов падения света  $0-30^\circ$  покрытие обладает высоким пропусканием во всей видимой области спектра, при дальнейшем увеличении угла падения коэффициент пропускания в длинноволновой области уменьшается, но не так быстро, как для предыдущего покрытия, так что это покрытие может работать в более широком диапазоне углов.

Кроме широкополосных просветляющих покрытий синтезировалось просветляющее лазерное покрытие для одной длины волны  $\lambda_0 = 0,53$  мкм. Синтез проводился методом игольчатых вариаций. Выбиралась показателя преломления слоев  $n_1=1,96$  и  $n_2=1,46$ . Полученная система имеет два слоя, толщины слоев от подложки в  $\text{Å}$ : 1072; 818 (или в четвертьволновых долях: 1,586; 0,902), прилегающий к подложке слой имеет показатель преломления  $n_1=1,96$ . На рис. 2 представлена зависимость коэффициента пропускания на длине волны  $\lambda_0$  от угла падения излучения  $\theta$ . В диапазоне углов  $0-50^\circ$  коэффициент пропускания  $T(\lambda_0, \theta)$  превышает 99,2%.

Еще один очень распространенный на практике тип покрытий — широкополосные светоделители. Среди них наиболее распространенные — 50% светоделители. Синтез широкополосного 50% светоделителя для видимого диапазона спектра, работающего в широком диапазоне углов, проводился градиентными методами. В качестве начальных приближений использовались синтезированные ранее широкополосные светоделители для нормального падения света и для угла падения  $45^\circ$ . Спектральные коэффициенты пропускания при различных углах падения лучшего из полученных покрытий представлены на рис. 3: нормальное падение (1), угол падения  $45^\circ$  (2) и  $60^\circ$  (3). Покрытие было получено оптимизацией 9-слойного светоделителя, синтезированного для нормального падения света. Показатели преломления нечетных слоев  $n_1=2,3$ , четных —  $n_2=1,4$ , толщины слоев от подложки в  $\text{Å}$ : 143, 445, 1501, 402, 433, 245, 784, 1040, 677 (толщины слоев начального приближения: 136, 424, 1430, 383, 412, 233, 746, 990,

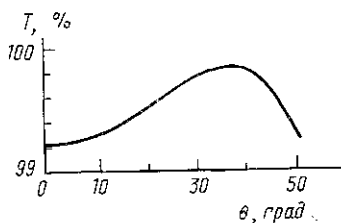


Рис. 2

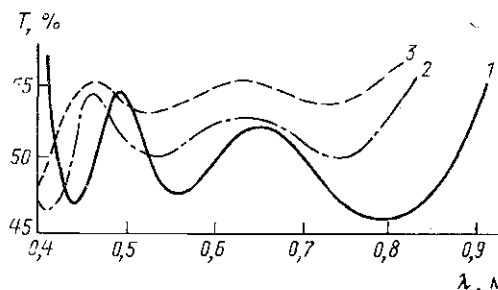


Рис. 3

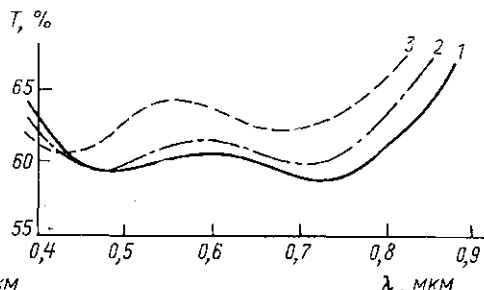


Рис. 4

635  $\text{Å}$ ). Во всей видимой области спектра (и даже в более широкой области длин волн) отклонение коэффициента пропускания покрытия  $T(\lambda, \theta)$  от заданного значения  $T(\lambda, \theta)=50\%$  для углов падения  $\theta$  от 0 до  $50^\circ$  не превосходит 5% (5% — традиционный критерий точности для широкополосных светоделителей). Но, как видно из рис. 3, покрытие может использоваться и при больших углах падения света.

Во многих случаях требуются широкополосные светоделители с другим фиксированным коэффициентом пропускания. На рис. 4 представлен спектральный коэффициент пропускания при различных углах падения света синтезированного 60% светоделителя, предназначенного для работы в видимом диапазоне спектра в очень широком диапазоне углов падения: от 0 до 60°: нормальное падение (1), угол падения 30° (2) и 60° (3). Как видно, для всей видимой области спектра отклонение коэффициента пропускания покрытия  $T(\lambda, \theta)$  от заданного значения 60% для всех углов не превосходит 5%. Синтез проводился методом игольчатых вариаций. Полученная система состоит из пяти слоев, показатели преломления нечетных от подложки слоев  $n_1=2,3$ , четных —  $n_2=1,4$ , толщины слоев от подложки в А: 129, 337, 1299, 613, 722 (толщина начального приближения 3100 Å).

Следующее покрытие синтезировалось для устройств, принимающих лазерное излучение при лазерной связи. Сигнал может поступать из некоторого диапазона углов, поэтому и покрытие предназначено для работы в диапазоне углов. Необходимо, чтобы покрытие хорошо пропускало излучение на лазерной длине волны  $\lambda_0$  и обрезало излучение на близких длинах волн. При синтезе этого покрытия использовались оба подхода. Спектральные коэффициенты пропускания при различных углах падения синтезированного 9-слойного покрытия представлены на рис. 5: нормальное падение (1), угол падения 15° (2) и 30° (3). Показатели преломления нечетных слоев  $n_1=2,3$ , четных —  $n_2=1,4$ , толщины слоев от подложки в четвертьволновых единицах: 1,011, 0,685, 1,473, 0,249, 4,799, 0,496, 1,373, 0,664, 0,880. Для всех углов падения в диапазоне 0—30° коэффициент пропускания на лазерной частоте был не менее 70%, относительная ширина спектральной области пропускания по уровню 70%  $\Delta\lambda/\lambda_0 < 6\%$ . Это покрытие было синтезировано методом игольчатых вариаций. При синтезе покрытий градиентными методами в качестве начальных приближений выбирались традиционные узкополосные интерференционные фильтры как для нормального падения света, так и для углов падения 15° и 30°. Но хороших результатов оптимизацией стандартных фильтров получить не удалось. Так, при

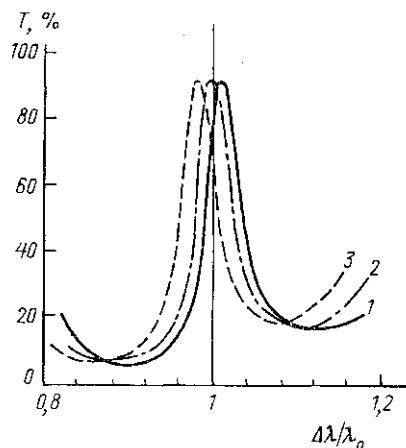


Рис. 5

оптимизации 9-слойных фильтров лучшая система также имеет коэффициент пропускания на лазерной длине волны не менее 70% в диапазоне углов 0—30°, но относительная ширина спектральной области пропускания по уровню 70%  $\Delta\lambda/\lambda_0$  составляет уже 22%. То есть это покрытие значительно хуже обрезает излучение на прилегающих длинах волн. При оптимизации 11-слойных фильтров в диапазоне углов падения 0—30° коэффициент пропускания на лазерной частоте оказывается  $T(\lambda, \theta) \geq 65\%$ , и относительная ширина спектральной области пропускания по уровню 65% составляет 8%. Следовательно, для этой системы пропускание на лазерной частоте ниже, а спектральная область пропускания шире, чем у приведенного выше покрытия. При оптимизации фильтров с большим числом слоев снижается уровень пропускания на лазерной час-

тоте, при оптимизации фильтров с меньшим числом слоев расширяется область пропускания.

Приведенные примеры показывают, что при синтезе покрытий с заданными спектральными характеристиками в диапазоне углов падения могут использоваться оба подхода. Но, как видно, в ряде случаев оптимизацией уже известных систем не удастся получить требуемых покрытий и метод игольчатых вариаций оказывается предпочтительнее.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонравов А. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1982. 23, № 6. С. 91.
2. Свешников А. Г., Тихонравов А. В., Яншин С. А. // ЖВМ и МФ. 1983. 23, № 4. С. 929.
3. Гришина Н. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1986. 27, № 5. С. 26.
4. Гришина Н. В., Тихонравов А. В. // Опт. и спектр. 1988. 65, № 5. С. 1170.

Поступила в редакцию  
04.07.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 3

### ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.22:531

#### РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ НЕСООТВЕТСТВИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te/CdTe$ И $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te/CdTe$

Ю. В. Кочетков, В. Н. Никифоров, О. Н. Васильева

(кафедра физики низких температур)

Проведен расчет анизотропных напряжений несоответствия в переходном слое между несогласованными по параметру решетки пленкой и подложкой в гетероструктурах типа  $CdHgTe/CdTe$  для различных способов взаимной ориентации пленки и подложки. Результат продемонстрировал незначительную роль этого слоя в создании дефектов в пленке по сравнению со случаем полного согласования. Показано, что для согласованной гетероструктуры типа  $CdHgTe/CdZnTe$  взаимодиффузия приводит к возникновению напряженного переходного слоя, который может стать источником дислокаций, проникающих в пленку.

#### Введение

В последние десятилетия значительное внимание уделялось проблеме образования дефектов в различных полупроводниковых гетероструктурах, в том числе и типа  $CdHgTe/CdTe$ . Этот тип гетероструктур привлекает внимание тем, что дает возможность создать детекторы ИК-излучения в диапазоне  $\lambda \sim 2-14$  мкм с достаточно широкой площадью. Однако наличие большого числа дефектов значительно ухудшает рабочие характеристики гетероструктур.

В статье приводится анализ влияния переходного слоя, возникающего при напылении пленки, на дефектообразование, а также рассчитываются величины напряжений несоответствия для трех различных способов взаимной ориентации пленки и подложки. Результаты расчетов показывают, что возникающий переходный слой не приводит к существенному изменению картины напряжений по сравнению со случаем его отсутствия (случай жесткой границы).