

1. При облучении кварца реакторными потоками $\sim 5 \cdot 10^{18}$ н/см² имеет место изменение не только ширины, но и частот линий КРС, однако их интегральные интенсивности практически сохраняются.

2. Указанные изменения практически полностью обусловлены нейтронной компонентой излучения, поскольку доза $3 \cdot 10^{10}$ Р, совпадающая с дозой сопровождающего ионизирующего излучения в реакторе, ощутимых результатов не произвела.

3. Методы КРС и РСКРС являются более чувствительными к радиационным воздействиям, чем метод рентгеноструктурного анализа, позволяющий регистрировать изменения кристаллической решетки кварца лишь с доз $1-1,5 \cdot 10^{19}$ н/см² [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зубов В. Г., Осипова Л. П. // Кристаллография. 1970. 15, № 2. С. 313.
[2] Зубов В. Г., Осипова Л. П. // Кристаллография. 1977. 22, № 1. С. 110.
[3] Колонцова Е. В. // УФН. 1987. 151, № 1. С. 149. [4] Жданов Г. С., Зубов В. Г., Иванов А. Т., Фирсова М. М. // Кристаллография. 1958. 3, № 6. С. 720. [5] Зубов В. Г., Штыркова А. П., Фирсова М. М., Глушкова Т. М. // Кристаллография. 1983. 28, № 5. С. 937. [6] Брикман Б. А. Компоненты поглощенной энергии реакторного излучения. М., 1976. [7] Авакянц Л. П., Китов И. А., Червяков А. В. // Приб. и техн. эксперимента. 1988. № 2. С. 145.
[8] Kats A. // Philips Res. Reports. 1962. 17, N 3. P. 201. [9] She C. Y., Masso Jon D., Edwards D. F. // J. Phys. Chem. Sol. 1971. 32, N 8. P. 1887. [10] Миргородский А. П., Лазарев А. Н., Макаренко И. П. // Опт. и спектр. 1970. 29, № 2. С. 539.

Поступила в редакцию
05.08.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 6

УДК 535.417

ЗЕРКАЛА ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ СО 180°-й РАЗНОСТЬЮ ФАЗ

Н. В. Гришина, А. В. Тихонравов, Н. Е. Шапкина

(кафедра математики)

Рассматривается синтез отражающих покрытий со 180°-й разностью фаз между *s*- и *p*-компонентами отраженного поля при угле падения 45° в диапазоне длин волны $\Delta\lambda/\lambda = \pm 5\%$. Приведены примеры синтезированных систем.

Одной из задач, возникших в связи с развитием лазерной физики, является синтез многослойных покрытий с заданными амплитудно-фазовыми спектральными характеристиками. Важный класс задач — создание высокоотражающих зеркал при наклонном падении света с постоянной разностью фаз между *s*- и *p*-компонентами (*TE*- и *TM*-волнами) отраженного поля в некотором спектральном интервале. В работе [1] рассматривался синтез при угле падения $\theta_0 = 45^\circ$ покрытия на серебре с 90°-м фазовым сдвигом между *s*- и *p*-компонентами. Для 20-слойного покрытия в диапазоне длин волн $\Delta\lambda/\lambda_0 = \pm 5\%$ ошибка разности фаз не превосходила 1°, а коэффициенты отражения обеих компонент были более 99,8%.

В настоящей работе рассматривается синтез покрытий на диэлектрической и алюминиевой подложках с разностью фаз 180° при угле падения $\theta_0 = 45^\circ$. Используется метод синтеза, основанный на вариационной постановке задачи. Оценочный функционал при синтезе по-

крытий с заданными коэффициентами отражения для s - и p -поляризации, $\hat{R}^s(\lambda)$ и $\hat{R}^p(\lambda)$, и с заданной разностью фаз $\hat{\varphi}(\lambda)$ имеет вид

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v^s(\lambda) (R^s - \hat{R}^s)^2 d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v^p(\lambda) (R^p - \hat{R}^p)^2 d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) (\varphi^s - \varphi^p - \hat{\varphi})^2 d\lambda,$$

где $[\lambda_1, \lambda_2]$ — спектральный интервал, в котором проводится синтез; $v^s(\lambda)$, $v^p(\lambda)$, $v(\lambda)$ — весовые функции; $R^s(\lambda)$ и $R^p(\lambda)$ — энергетические коэффициенты отражения системы, $\varphi^s(\lambda)$ и $\varphi^p(\lambda)$ — фазы коэффициентов отражения системы для s - и p -компонент поля соответственно. В нашем случае $\hat{R}^s(\lambda) = \hat{R}^p(\lambda) = 1$; $\hat{\varphi}(\lambda) = \pi$.

В наиболее распространенных, четвертьволновых, зеркалах на центральной длине волны λ_0 разность фаз между s - и p -компонентами отраженного поля составляет 180° , но она сильно меняется при отклонении от λ_0 . Использование четвертьволновых зеркал в качестве начальных приближений при минимизации оценочного функционала методом градиентного спуска не дало хороших результатов. При рассмотрении более 100 вариантов со случайным выбором начальных приближений параметров системы достаточно хорошая конструкция также не была найдена. Поэтому для решения поставленной задачи был использован метод синтеза покрытий, состоящий из двух этапов. На первом этапе производится синтез покрытий путем перебора толщин их слоев на заданных сетках. Лучшие из полученных вариантов используются в качестве начальных приближений на втором этапе, при дальнейшей оптимизации систем методами градиентного спуска и сопряженных направлений. Для синтеза покрытий с заданными энергетическими характеристиками при нормальном падении света метод синтеза, сочетающий перебор значений параметров системы и метод градиентного спуска, был разработан в [2]. Для расчета энергетических коэффициентов покрытия в [2] использовалась матричная методика, которая более эффективна в вычислительном отношении при отсутствии поглощения в системе. В данной работе, поскольку не исключалось использование поглощающих материалов, коэффициенты отражения покрытий считаются непосредственно по рекуррентным формулам.

Рассмотрим N -слойную систему при наклонном падении света. Пусть слои нумеруются от внешней среды к подложке и j -й слой характеризуется толщиной d_j и комплексным показателем преломления $\tilde{n}_j = n_j + i\chi$, где мнимая часть χ отвечает за поглощение. Обозначим через $r^{s,p}$ амплитудные коэффициенты отражения подсистем слоев с номерами от $j+1$ до N для s - и p -поляризаций соответственно. Величины $r^{s,p}$ находятся по рекуррентным формулам

$$r_{j-1}^{s,p} = \frac{\rho_{j-1}^{s,p} + r_j^{s,p} e^{2i\alpha_j}}{1 + \rho_{j-1}^{s,p} r_j^{s,p} e^{2i\alpha_j}},$$

$$r_N^{s,p} = \rho_N^{s,p}.$$

Здесь $\alpha_j = 2\pi \tilde{n}_j d_j \cos \theta_j / \lambda$, где θ_j — комплексный угол распространения волны в j -м слое, определяемый из закона преломления; $\tilde{n}_j \sin \theta_j = n_0 \sin \theta_0$; $\rho_{j-1}^{s,p}$ — френелевские коэффициенты отражения границы раздела соседних $j-1$ -го и j -го слоев для s - и p -компонент поля:

$$\rho_{j-1}^{s,p} = \frac{q_{j-1}^{s,p} - q_j^{s,p}}{q_{j-1}^{s,p} + q_j^{s,p}},$$

где $q_j^s = \tilde{n}_j \cos \theta_j$ и $q_j^p = \cos \theta_j / \tilde{n}_j$.

Энергетические коэффициенты отражения системы и фазы коэффициентов отражения для s - и p -поляризации выражаются через амплитудные коэффициенты отражения системы:

$$R^{s,p} = |r_0^{s,p}|^2; \quad \varphi^{s,p} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(r_0^{s,p})}{\operatorname{Re}(r_0^{s,p})}.$$

Перед началом перебора задается сетка значений толщин слоев в долях четвертьволновых толщин t_l , $l=1, 2, \dots, L$, и сетка длин волн λ_k , $k=1, 2, \dots, K$, на которой проводится синтез (L и K — число разбиений по толщинам слоев и длинам волн соответственно). На этих сетках для ускорения расчетов вычисляются и запоминаются значения экспонент $e^{2i\alpha_j}$:

$$E_{k,l} = \exp\left(\frac{\pi\lambda_0}{2\lambda_k} t_l\right);$$

величины $\rho_j^{s,p}$ также рассчитываются и хранятся в памяти. (Отметим, что если некоторые слои имеют поглощение, то в сетку толщин t_l будут входить и комплексные значения, у которых действительная часть будет равна оптической толщине покрытия в четвертьволновых долях, а мнимая часть будет связана с поглощением: $\operatorname{Im}(t_l) = \operatorname{Re}(t_l)\chi_j/n_j$). Число варьируемых слоев в программе не превышает 13. Толщины разных слоев могут варьироваться не на всей сетке значений, а каждая на своей подсистеме из набора t_l . В процессе синтеза отбирается заданное число M лучших вариантов. Полученные после перебора системы используются в качестве начального приближения при дальнейшей минимизации функционала F .

Метод градиентного спуска во всех случаях дает незначительное уменьшение функционала. Поэтому при минимизации F используется сочетание метода градиентного спуска с методом сопряженных направлений, применение которого для минимизации функционалов, включающих фазы, дает значительно лучшие результаты. Структура программы минимизации F аналогична структуре программы, описанной в [3]. Производные фаз и энергетических коэффициентов отражения системы по толщинам слоев, входящие в градиент функционала, выражаются через производные амплитудных коэффициентов отражения системы:

$$\frac{d\varphi^{s,p}}{d(d_j)} = \operatorname{Im}\left(\frac{1}{r_0^{s,p}} \frac{dr_0^{s,p}}{d(d_j)}\right); \quad \frac{dR^{s,p}}{d(d_j)} = 2 \operatorname{Re}\left((r_0^{s,p})^* \frac{dr_0^{s,p}}{d(d_j)}\right).$$

Величины $dr_0^{s,p}/d(d_j)$ рассчитываются по рекуррентным формулам, аналогичным полученным в [3] для нормального падения света.

Приведем в качестве примеров синтеза два отражающих двухкомпонентных покрытия: 31-слойное на подложке с показателем преломления $n_1=1,52$ и 25-слойное на алюминиевой подложке ($\tilde{n}_1=0,50+4,59i$). Показатели преломления чередующихся диэлектрических слоев: $n_1=2,30$; $n_2=1,40$. Первый от воздуха слой имеет показатель преломления $n_1=2,30$. И в той и в другой конструкции расчетные коэффициенты отражения для обеих поляризаций превышали 99,5%.

На рис. 1 приведены разности фаз полученного диэлектрического зеркала и четвертьволновых зеркал, сконструированных из тех же диэлектрических материалов. Кривая 1 дает разность фаз для 31-слойного четвертьволнового зеркала; прилежащий к воздуху слой имеет показатель преломления $n_1=2,30$. Кривая 2 — разность фаз для 32-слой-

ного четвертьволнового зеркала; первый от воздуха слой имеет $n_1=1,40$. Кривая 3 — разность фаз для синтезированного диэлектрического зеркала. В диапазоне длин волн $\Delta\lambda/\lambda_0=\pm 4,5\%$ разность фаз $\varphi^s-\varphi^p-\pi\leq 0,5^\circ$.

На рис. 2 приведена разность фаз синтезированного 25-слойного покрытия на алюминиевой подложке. В диапазоне длин волн $\Delta\lambda/\lambda_0=\pm 4\%$ разность фаз $\varphi^s-\varphi^p-\pi\leq 1^\circ$.

Толщины слоев, отличные от четвертьволновых, для обеих синтезированных систем приведены в таблице (слой отсчитывается от воздуха).

Описанный выше метод может быть использован для получения систем с различными амплитудно-фазовыми характеристиками в отраженном свете, при этом оценочный функционал может иметь и другой вид.

В заключение отметим, что в данном случае, в отличие от синтеза покрытий с заданными энергетическими характеристиками при нормальном падении света [2], градиентные методы играют значительно меньшую роль. Метод градиентного спуска во всех случаях дает незначительное уменьшение функционала, метод сопряженных направлений оказывается существенно более эффективным, но

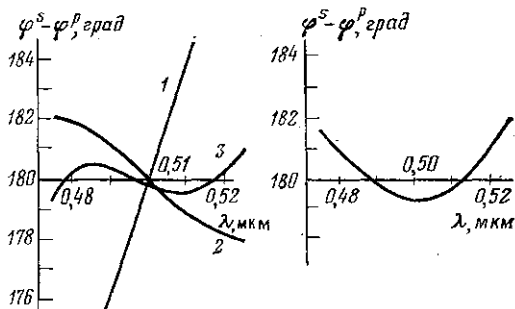


Рис. 1

Рис. 2

Толщины слоев синтезированных систем, отличные от четвертьволновых

Номер слоя	Толщины слоев в четвертьволновых долях		Номер слоя	Толщины слоев в четвертьволновых долях	
	система I (рис. 1)	система II (рис. 2)		система I (рис. 1)	система II (рис. 2)
1	0,101	0,096	9	0,106	1,009
2	0,800	0,701	10	0,102	1,003
3	1,106	0,111	11	0,106	1,006
4	0,702	0,101	12	0,101	1,001
5	0,604	0,810	13	0,106	1,003
6	0,901	0,705	14	1,001	1,001
7	1,106	1,014	15	1,002	1,002
8	0,102	1,003	17		1,001

также не позволяет значительно улучшить свойства системы. Это, по-видимому, связано с большим количеством близко расположенных локальных минимумов данных функционалов. Поэтому основную роль здесь играет первый этап синтеза — перебор толщин слоев на заданных сетках. Причем сетки должны быть значительно более мелкими, чем в случае нормального падения света. Число вариантов, отбираемых в процессе перебора толщин слоев, в данном случае равняется 3—5 (как показывает опыт расчетов, улучшение следующих далее вариантов не имеет смысла), в отличие от случая нормального падения, где отбиралось и затем оптимизировалось 50—100 лучших вариантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Southwell W. H. // Appl. Opt. 1980. 19. P. 2688. [2] Свешников А. Г., Фурман Ш. А., Тихонравов А. В., Яншин С. А. // Опт. и спектр. 1985. 59, № 5. С. 1161. [3] Гришина Н. В., Тихонравов А. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1985. 26, № 1. С. 11.

Поступила в редакцию
14.08.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 6

ГЕОФИЗИКА

УДК 552.1:53

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ПРОБЛЕМА ОБРАЗОВАНИЯ МАГМЫ

М. В. Авдулов

(кафедра физики Земли)

В режиме периодических изменений температуры происходит разделение земной оболочки на минералогические фракции при температуре ниже температуры солидуса горных пород. Рассматривается физическая модель образования магматических расплавов разного химического состава.

Известно, что в первом тысячекилометровом слое оболочки Земли, получившем название верхней мантии, градиенты плотности и скорости упругих колебаний аномально велики. Теоретические исследования Ф. Бёрча и В. А. Магницкого показали, что аномалии плотности и скорости упругих колебаний в верхней мантии вызваны полиморфными превращениями и химическими реакциями в силикатах [1, 2]. Позднее эта гипотеза была экспериментально подтверждена А. Рингвудом, Д. Грином, А. Мейджером, С. Акимото и др. Опираясь на данные термодинамики и соображения геофизического характера, В. А. Магницкий пришел к выводу, что источником главных тектонических движений в коре и верхней мантии Земли могут служить фазовые переходы и химические реакции [3]. Дальнейшим развитием этих представлений стала работа [4], в которой была рассмотрена модель разделения оболочки земного шара на минералогические фракции под действием полиморфных превращений.

Горные породы, входящие в состав оболочки Земли, — это агрегаты минералов, состоящие из кристаллов двух групп. К первой группе относятся кристаллы, испытывающие полиморфные превращения с изменением объема, ко второй — не испытывающие фазового перехода. Их можно рассматривать как сплошную среду, заполняющую пространство между кристаллами первой группы.

Допустим, что на рассматриваемом участке верхней мантии температура меняется по закону синуса. Тогда вместе с периодическими изменениями температуры будут пульсировать кристаллы 1-й группы, меняя свой объем. В этом случае между пульсирующими кристаллами возникают силы взаимного притяжения (эффект Бьеркнеса), причем кристаллы 1-й группы выжимают в сторону низких давлений минералы, заполняющие пространство между ними, что приводит к разделению оболочки земного шара на минералогические фракции при температуре ниже температуры солидуса горных пород [5—7].

Чтобы рассмотренная схема разделения оболочки земного шара на минералогические фракции имела место, необходимы периодические изменения температуры. Эта задача была рассмотрена в [6], где было