ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

Мкртычев О. В., доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, (Новороссийский Филиал)

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН С СИСТЕМОЙ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СРЕД

oleg214@ya.ru

В статье анализируется взаимодействие волн с системой плоскопараллельных сред. Исследуется пример светового излучения в рамках лучевой модели геометрической оптики. Полученная математическая модель даёт простой и наглядный алгоритм определения потерь энергии на поглощение средами прослойки при таком взаимодействии.

Ключевые слова: *плоскопараллельные среды, лучевая модель, геометрическая оптика.*

Введение. Взаимодействие волн с многослойными системами явление интересное и в теоретическом, и в практическом плане [1-7]. Задачи, связанные с рассмотрением этого явления, постоянно возникают при рассмотрении распространения тепла в конструкциях и элементах оптики в приборостроении, в процессах распространения мощного лазерного излучения, в задачах, связанных с технологией получения тонкоплёночных покрытий с заданными характеристиками [8-12].

В данной статье, как и в [13, 14], рассматривается световой луч, проходящий сквозь плоские границы системы плоскопараллельных однородных и изотропных сред между двумя полубесконечными однородными и изотропными средами. Цель работы описать процесс взаимодействия светового луча в динамике и определить диссипативные потери излучения, возникающие только из-за геометрической структуры строения прослойки, состоящей из плоскопараллельных сред. В каждой точке падения луч падающий разбивается на луч преломлённый и отражённый, каждый из которых продолжает движение в соответственной среде.

Основная часть. Следуя обозначениям и методологии, изложенной в [13, 14], рассмотрим количество образующихся в системе плоскопараллельных сред количества точек (таблица 1).

Таблица 1

Количество образующихся точек взаимодействия в системе плоскопараллельных границ для первых 10 временных шагов

Шаг по времени, k (1, …, K)	Количество границ в прослойке, l = (2, …, L)					
	2	3	…	l	…	L
1	(n_{11}, n_{12})	(n_{11}, n_{12}, n_{13})	…	$(n_{11}, n_{12}, \ldots, n_{1l})$	…	$(n_{11}, n_{12}, \ldots, n_{1L})$
2	(n_{21}, n_{22})	(n_{21}, n_{22}, n_{23})	…	$(n_{21}, n_{22}, \ldots, n_{2l})$	…	$(n_{21}, n_{22}, \ldots, n_{2L})$
3	(n_{31}, n_{32})	(n_{31}, n_{32}, n_{33})	…	$(n_{31}, n_{32}, \ldots, n_{3l})$	…	$(n_{31}, n_{32}, \ldots, n_{3L})$
…	…	…	…	…	…	…
k	(n_{k1}, n_{k2})	(n_{k1}, n_{k2}, n_{k3})	…	$(n_{k1}, n_{k2}, \ldots, n_{kl})$	…	$(n_{k1}, n_{k2}, \ldots, n_{kL})$
…	…	…	…	…	…	
K	(n_{K1}, n_{K2})	(n_{K1}, n_{K2}, n_{K3})	…	$(n_{K1}, n_{K2}, \ldots, n_{Kl})$	…	$(n_{K1}, n_{K2}, \ldots, n_{KL})$

Общая формула для $n_{kl} = n(k, l)$ имеет вид [14]:

$$n(k,l) = n(k-1, l-1) + n(k-1, l+1),$$

где $l = 2, \ldots, L$ (L – число границ в прослойке), с первыми членами вида

$$\begin{cases} n(1,1) = 1, \\ n(1,l) = 0, \quad l = 2,3, \ldots L, \end{cases}$$

и краевыми членами вида

$$\begin{cases} n(k,0) = 0, \\ n(k, L+1) = 0. \end{cases}$$

Следовательно, если просуммировать все элементы одного столбца в таблице 1, например l-того, получится общее количество точек, образовавшихся на l-ой границе за все моменты времени $\sum_{k=1}^{K} n(k,l)$. Аналогично, если просуммировать все элементы одной строки таблицы 1, например k-ой, получится общее число точек в момент времени $t = k$, образовавшихся на всех границах системы $\sum_{l=2}^{L} n(k,l)$. Таким образом, если рассматривать таблицу 1, как таблицу с двумя входами и просуммировать все элементы таблицы по обоим индексам k и l, то получится общее число точек N на всех границах за все время рассмотрения:

$$N = \sum_{l=2}^{L}\sum_{k=1}^{K} n(k,l)$$

Сразу отметим, что порядок суммирования можно менять:

$$\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=1}^{K} n(k,l) = \sum_{k=1}^{K}\sum_{l=2}^{L} n(k,l)$$

Эта же формула позволяет вычислить и общее число точек N на всех границах за все время рассмотрения, при прохождении лучом света системы концентрических сред. Однако в этом случае общая формула для элемента $n_{kl} = n(k, l)$ каждой ячейки таблицы 1имеет вид [14]:

$$n(k,l) = n(k-1,l-1) + n(k-1,l+1),$$

где $l = 2, \ldots, L$ (L – число границ в прослойке), с первыми членами вида

$$\begin{cases} n(1,1) = 1, \\ n(1,l) = 0, \quad l = 2,3, \ldots L, \end{cases}$$

и краевыми членами вида

$$\begin{cases} n(k,0) = 0, \\ n(k,L+1) = 0, \qquad k = 1,2 \ldots L-1, \\ n(k,L+1) = n(k,L), \quad k = L, L+1, \ldots \end{cases}$$

Рассмотрим также поглощение, испытываемое светом при прохождении каждой среды прослойки. Если, следуя методологии [14], проследить пошагово распространение света в каждой среде на каждом моменте времени, то можно придти к следующим выводам. В таблице 2 записаны количество точек образующихся на границах системы прослоек с 4 границами, в течение первых 6 шагов по времени (без учёта разницы по времени при прохождении лучом разных сред).

Таблица 2

Количество точек взаимодействия в системе плоскопараллельных границ для первых 6 временных шагов

Шаг по времени	Количество границ в прослойке		
	2	3	4
1	(1,0)	(1,0,0)	(1,0,0,0)
2	(0,1)	(0,1,0)	(0,1,0,0)
3	(1,0)	(1,0,1)	(1,0,1,0)
4	(0,1)	(0,2,0)	(0,2,0,1)
5	(1,0)	(2,0,2)	(2,0,3,0)
6	(0,1)	(0,4,0)	(0,5,0,3)
…	…	…	….

В таблице 3 учитываются процессы поглощения, происходящие при распространении луча света в средах между соседними моментами времени для системы прослоек с 4 границами. При этом поглощение на прямом пути света, например между первой и второй границей 1→2, учитывается отдельно от поглощения для отражённых лучей, соответственно 2→1. Вначале записывается прямой путь света и после этого обратный. Например, при прохождении через все три среды прослойки запишутся сначала процессы поглощения при движении прямо в направлении преломляемых лучей 1→2, 2→3, 3→4, и затем процессы поглощения в средах при движении обратно в направлении отражаемых лучей 4→3, 3→2, 2→1.

Таблица 3

Количество процессов поглощения в системе плоскопараллельных границ для первых 6 временных шагов

Шаг по времени	Поглощение		
	(1→2, 2→1)	(1→2, 2→3, 3→2, 2→1)	(1→2, 2→3, 3→4, 4→3, 3→2, 2→1)
1	(0, 0)	(0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 0, 0)
2	(1, 0)	(1, 0, 0, 0)	(1, 0, 0, 0, 0, 0)
3	(0, 1)	(0, 1, 0, 1)	(0, 1, 0, 0, 0, 1)
4	(1, 0)	(1, 0, 1, 0)	(1, 0, 1, 0, 1, 0)
5	(0, 1)	(0, 2, 0, 2)	(0, 2, 0, 1, 0, 2)
6	(1, 0)	(2, 0, 2, 0)	(2, 0, 3, 0, 3, 0)
…	…	…	….

Если обозначить число процессов поглощения в момент времени k при распространении луча в среде между границей l и $(l + 1)$ через $s(k, l \to l + 1)$, то сравнение таблиц 2 и 3 позволяет заметить следующую закономерность:

$$s(k, l \to l-1) = s(k, l \to l+1) = n(k,l).$$

Суммирование по столбцам и строкам соответственных элементов таблицы 3 будет иметь тот же смысл для процессов поглощения, что и суммирование для столбцов и строк таблицы 1 для количества образующихся точек взаимодействия луча с границами прослойки. Следовательно, если просуммировать все элементы одного столбца в таблице 3, например l-того, получится общее количество процессов поглощения, образовавшихся при распространении света вплоть до l-ой границы за все моменты времени $\sum_{k=1}^{K} s(k,l)$. Аналогично, если просуммировать все элементы одной строки таблицы 3, например k-ой, получится общее число процессов поглощения в момент времени $t = k$, образовавшихся при распространении света во всех средах прослойки $\sum_{l=2}^{L} s(k,l)$. Таким образом, если просуммировать все элементы таблицы по обоим индексам k и l, то получится общее число процессов поглощения S на всех границах за все время рассмотрения:

$$S = \sum_{l=2}^{L} \sum_{k=1}^{K} s(k,l)$$

Выводы. Подобное применение изложенной в работе [13, 14] методологии позволяет рассматривать процессы распространения света в системах плоскопараллельных и концентрических сред с учётом поглощения. Данные формулы легко поддаются автоматическому вычислению, например в системах Mathematica™ или Matlab™ [15], и позволяют находить искомые параметры задач с требуемым уровнем точности.

Рассмотренные в данной работе процессы взаимодействия светового излучения с системой плоскопараллельных и концентрических сред, переносятся на взаимодействие любого энергетического поля, если распространение энергии в данном поле можно представить лучевой моделью. При переходе энергии через границу двух сред надо каждый раз требовать выполнения закона сохранения энергии между падающим лучом до взаимодействия и отражённым и преломлённым лучом после него. А при распространении луча в одной среде необходимо учитывать, что прохождение энергии в каждой среде сопровождается процессом диссипации энергии и каждая среда прослойки будет характеризоваться соответственным коэффициентом поглощения/ослабления энергии. Поэтому закон сохранения энергии должен быть соблюдён для энергии преломлённого в среду луча на данной границеи энергии отражённого от следующей границе плюс поглощённая в самой среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гинзбург В.Л. Теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Гостехиздат, 1949. 312 с.
2. Алексеев А.С. Некоторые законы распространения волн в неоднородной сред // ДАН СССР. 1955. № 103. С.989–996.
3. Зволинский Н.В. Многократные отражения упругих волн в слое // Труды Геофиз ин-та. 1952. № 22. С. 43–47.
4. Ржанов А.В. Эллипсометрия – метод исследования поверхности. Новосибирск: Наука, 1983. 182 с.
5. Scandone F., Ballerini L / Nuovo Chim. 1946. v.3. P.81–115.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 650 с.
7. Кузьмин В.Л. Многократное рассеяние в задаче о распространении света в среде // Оптика и спектроскопия. 1976. Т.40. С. 552–557.
8. Хевенс О.С. Измерение оптических констант тонких плёнок / пер. М. М. Аверьяновой// Физика тонких пленок /Под ред. Г. Хасса и Р. Э. Туна. Т. 2. – М.: Мир, 1967. -С.136-185.
9. Физика тонких плёнок. Под ред. В. С. Хангулова. Т. 1. – М.: Мир, 1967. – 344 с.
10. Mkrtychev O.V., Shemanin V.G. Moment method in laser ablation thermal model // Physics of extreme states of matter. Ed. by Fortov V.E. Moscow. 2013. P.47–49.
11. Аткарская А.Б., Мкртычев О.В., Шеманин В.Г. Изменение показателя преломления наноразмерных плёнок при модифицировании стеклянных подложек // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. №8/2. С.238–239.
12. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах // М. Наука. 1973. 343 с.
13. Мкртычев О.В. Аналитическое исследование энергетических коэффициентов отражения и преломления света // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2012. №4. С.36–37.
14. Мкртычев О.В., Кадрик К.А. К динамике и кинематике энергетического взаимодействия с системой плоскопараллельных или концентрических сред // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. Научно-теоретический журнал – №1. 2014. – Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова. – С.233–237.
15. Мкртычев О. В. Компьютерное моделирование при кинематическом анализе плоских механизмов // ТММ СПбГТУ, №1, 2012. – С. 46–53.