

## РАССЕЯНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ ДИЭЛЕКТРИКОВ, ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МЕТАЛЛОВ

В. Н. Лебедева

На ЭВМ рассчитаны коэффициенты ослабления (поглощение+рассеяние) для цилиндров из диэлектрика AgCl, полупроводников Ge, Si, Se и металлов Ag, Hg, Cu, Al. Расчеты проведены для области длин волн от 0.1—10 мкм. Диаметры цилиндров составляли 20÷200 нм. Выяснены условия получения максимального дихроизма при рассеянии света на цилиндрических частицах. Проведено разделение ослабления на поглощение и рассеяние.

### Введение

Настоящая работа является продолжением ряда статей, посвященных расчетам рассеяния и поглощения инфракрасного излучения частицами удлиненной формы [1-3]. Эти расчеты были связаны с созданием поляризационных текстур для инфракрасной области спектра [4]. Сами текстуры, как показали электронномикроскопические исследования, состоят из удлиненных, ориентированных в одном направлении частиц золота, внедренных в пленку полимера [5]. В предыдущей статье [6] были приведены результаты расчетов ослабления света (поглощение+рассеяние) цилиндрическими частицами, имеющими различные значения оптических постоянных  $n$  и  $k$ . Выбранные для расчетов значения  $n$  и  $k$  соответствовали оптическим постоянным определенной группы диэлектриков, полупроводников и металлов, но в отличие от  $n$  и  $k$  реальных веществ не обладали дисперсией  $n$  и селективностью  $k$ . В настоящей статье сделан переход к реальным диэлектрикам, полупроводникам и металлам. Приводятся результаты расчетов рассеяния и поглощения цилиндрическими частицами из AgCl, Ge, Si, Se и металлических цилиндрами: Ag, Hg, Cu и Al. Так же как и в предыдущей статье, при проведении расчетов ставилась задача нахождения условий для получения максимального дихроизма при рассеянии света на цилиндрических частицах. Проведено сравнение результатов этих расчетов с результатами для усредненных оптических постоянных, приведенных в предыдущей статье [6].

Вторая часть работы посвящена разделению ослабления на поглощение и рассеяние, причем с этой точки зрения рассмотрены не только результаты расчетов для конкретных веществ, но и расчеты для упрощенных оптических постоянных, приведенные в [6]. Разделение ослабления на поглощение и рассеяние позволяет глубже понять физическую сущность процесса ослабления света.

Краткий обзор результатов численных расчетов рассеяния света на цилиндрах приведен в [6].

### Схема расчета

По формулам, приведенным в [7], были проведены расчеты факторов эффективности ослабления  $Q_{осл.}$  и рассеяния  $Q_{рас.}$  для бесконечно длинных цилиндров при перпендикулярном падении излучения. Фактор эффективности ослабления —  $Q_{осл.}$  — связан с коэффициентом ослабле-

ния —  $C_{\text{осл.}}$  — следующим соотношением:  $C_{\text{осл.}} = Q_{\text{осл.}} g$ , где  $g$  — поперечное сечение цилиндра.  $Q_{\text{осл.}} = Q_{\text{рас.}} + Q_{\text{погл.}}$ , где  $Q_{\text{погл.}}$  — фактор эффективности поглощения. Отдельно вычислялись факторы эффективности ослабления и рассеяния для параллельной —  $Q_{\parallel}$  — и перпендикулярной —  $Q_{\perp}$  — составляющей падающего излучения, когда электрический вектор  $E$  колеблется соответственно вдоль и поперек длинной оси цилиндра. Подробная схема расчета приведена в [3]. Все вычисления были проведены на ЭВМ Урал-2 по специально составленной программе. Расчеты проводились для области длин волн от 0.1 до 10 мкм, а в некоторых случаях до 20 мкм. Диаметры цилиндров составляли 20, 40, 60, 100, 200 нм. Параметр  $x = 2\pi a/\lambda$  (где  $a$  — радиус цилиндра,  $\lambda$  — длина волны) изменялся при этом от 0.006 до 6. Показатель преломления связующей среды  $m_0 = 1$ . Значения оптических постоянных для конкретных веществ были взяты из следующих работ: AgCl [8], Se [9], Si и Ge [10], Ag [11], Hg [12], Cu [13], Al [14]. Следует отметить, что при проведении расчетов для реальных веществ, в частности для металлов, сильная дисперсия заставляет каждому выбранному значению  $\lambda$  ставить в соответствие определенные значения  $n$  и  $\kappa$ . Фиксируя  $n$  и  $\kappa$  для каждой длины волны, мы в результате получаем кривые ослабления для цилиндров определенного фиксированного радиуса. Для проверки правильности проведенных расчетов был повторен расчет Ван-де-Хюлста для  $m = \sqrt{2}(1 - i)$ . Результаты полностью совпали с данными, приведенными в [7].

### Результаты расчетов

Значения факторов эффективности ослабления для цилиндров из Al и Cu, как наиболее характерных металлов, приведены на рис. 1 и 2. Ход кривых ослабления для этих металлических цилиндров очень близок к предельному случаю полностью отражающего цилиндра  $m = n - i\kappa = \infty$  [7]. Значения  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$  сильно отличаются друг от друга при малых  $x$  и

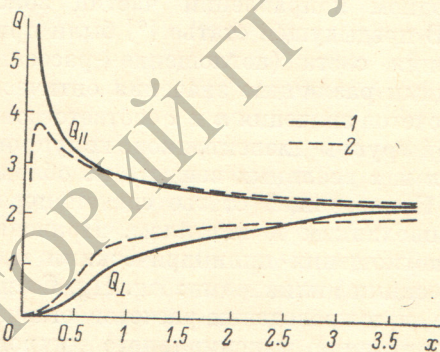


Рис. 1. Кривые ослабления для цилиндрических частиц.

1 — Al,  $a = 200$  нм; 2 —  $n = 4$ ,  $\kappa = 4$ .

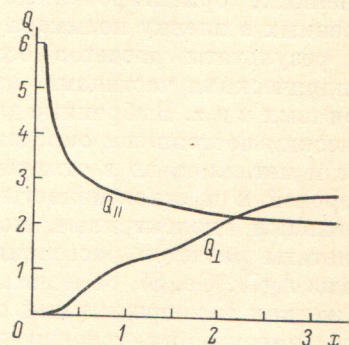


Рис. 2. Кривые ослабления для цилиндрических частиц меди ( $a = 200$  нм).

сближаются по мере увеличения  $x$ . В случае меди при  $x = 2.15$  наблюдается смена знака дихроизма — при  $x < 2.15$   $Q_{\parallel} > Q_{\perp}$ , а при  $x > 2.15$   $Q_{\perp} > Q_{\parallel}$ . Явление смены знака дихроизма при рассеянии света на цилиндрических частицах золота подробно рассмотрено в [3]. На рис. 1, кроме кривых ослабления для алюминия, приведены кривые для цилиндров с оптическими постоянными  $n = 4$ ,  $\kappa = 4$ . Сравнение кривых показывает, что общий ход их достаточно хорошо совпадает, однако при  $n = 4$ ,  $\kappa = 4$  увеличение  $Q_{\parallel}$  происходит только до определенного значения  $x = 0.12$ , после чего значения  $Q_{\parallel}$  быстро падают и, так же как  $Q_{\perp}$ , стремятся к нулю. В случае металлов и, в частности для Al, падение значений  $Q_{\parallel}$  еще не происходит при самых малых из исследованных  $x$ .

Поскольку наибольшая разница значений  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$  наблюдается при малых  $x$ , то более детально была рассмотрена область  $x < 0.3$ . При фикси-

рованном радиусе цилиндра область малых  $x$  соответствует наибольшей длине волны, что существенно при исследовании поляризации в инфракрасной области спектра. В табл. 1 приведены значения  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$ , а также

Таблица 1

$\lambda$ , мкм	$x = 2\pi a/\lambda$	Al, $a = 20$ нм			Ag, $a = 20$ нм			Cu, $a = 20$ нм		
		$Q_{\parallel}$	$Q_{\perp}$	$Q_{\parallel} - Q_{\perp}$	$Q_{\parallel}$	$Q_{\perp}$	$Q_{\parallel} - Q_{\perp}$	$Q_{\parallel}$	$Q_{\perp}$	$Q_{\parallel} - Q_{\perp}$
0.4	0.32	1.712	1.557	0.555	0.486	0.370	0.116	1.184	0.553	0.631
0.5	0.25	1.903	0.831	1.072	0.703	0.082	0.621	1.166	0.292	0.874
0.8	0.16	2.689	0.361	2.328	1.257	0.013	1.244	1.121	0.146	0.975
1.2	0.11	2.835	0.103	2.732	1.463	0.007	1.456	1.479	0.046	1.433
1.8	0.07	3.475	0.044	3.431	2.216	0.002	2.214	1.959	0.019	1.940
2.2	0.06	3.979	0.034	3.945	2.615	0.001	2.614	2.240	0.014	2.226
3.0	0.04	5.103	0.026	5.077	3.389	0.001	3.388	2.805	0.008	2.797
4.2	0.03	7.226	0.025	7.201	4.496	0.001	4.489	3.735	0.005	3.730
6.0	0.02	10.270	0.020	10.25	6.265	0.001	6.264	5.163	0.004	5.159
8.4	0.015	14.490	0.015	14.475	8.465	0.001	8.464	7.134	0.003	7.131
10	0.012	17.342	0.001	17.341	10.109	0	10.109	8.802	0.003	8.799
12	0.0105	20.446	0.001	20.445	11.016	0	11.016			
15	0.0084	26.041	0.001	26.040						
20	0.0063	34.3	0.0004	34.3						

их разность для ряда исследованных металлов. Из данных этой таблицы следует, что наибольший дихроизм наблюдается при рассеянии света на цилиндре из алюминия. Медь, серебро, так же как и золото, дают меньшую величину дихроизма при тех же значениях  $x$ , что связано с меньшими значениями  $n$  и  $k$  у этих металлов по сравнению с Al. Из всех приведенных расчетов наибольшая разница значений  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$  была получена для ци-

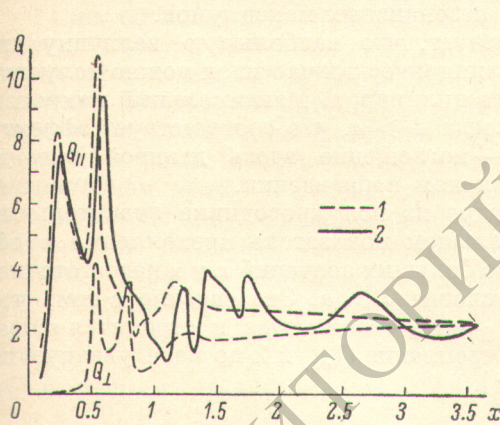


Рис. 3. Кривые ослабления для цилиндрических частиц.

1 — Ge,  $a = 200$  нм; 2 —  $n = 4$ ,  $x = 0$ ,  $Q_{\parallel}$ .

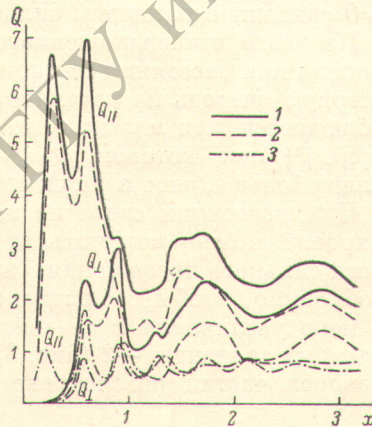


Рис. 4. Кривые ослабления, рассеяния и поглощения для цилиндрических частиц с оптическими постоянными  $n = 4$ ,  $x = 0.2$ .

1 —  $Q_{\text{осл.}}$ , 2 —  $Q_{\text{рас.}}$ , 3 —  $Q_{\text{погл.}}$ .

линдра из Al при  $x = 0.0063$ , где  $Q_{\parallel} = 34.3$ , а  $Q_{\perp} = 0.0004$  ( $a = 20$  нм,  $\lambda = 20$  мкм).

Исследование кривых ослабления для цилиндров из полупроводников Si, Ge, Se показывает, что эти кривые близки к кривым ослабления для цилиндров при  $n = 4$ ,  $x = 0$  в случае Si и Ge и к  $n = 2$ ,  $x = 0$  в случае Se. На рис. 3 даны кривые ослабления для Ge и значения  $Q_{\parallel}$  для  $n = 4$ ,  $x = 0$ . Из рисунков видно большое сходство кривых, особенно при  $x < 1$ , где находятся сильные резонансные максимумы. Наличие поглощения у выбранных полупроводников в видимой и ближней инфракрасной областях спектра сказывается в затухании максимумов при  $x > 1$ .

Цилиндры из диэлектриков подобных AgCl, обладающих в исследованном интервале длин волн слабой дисперсией и отсутствием поглощения, дают кривые ослабления, почти идентичные с кривыми для случая  $n=2$ ,  $x=0$  [6]. В табл. 2 даны значения  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$  для Se, Si, AgCl при малых  $x$  и для сравнения случаи  $n=4$ ,  $x=0$  и  $n=2$ ,  $x=0$ . Из данных табл. 2 видны

Таблица 2

$\lambda$ , мкм	$x$	Se, $a=20$ нм, $n \approx 2.5$		AgCl, $a=20$ нм, $n \approx 2$		$n=2, x=0$		Si, $a=20$ нм, $n=4$		$n=4, x=0$	
		$Q_{\parallel}$	$Q_{\perp}$	$Q_{\parallel}$	$Q_{\perp}$	$Q_{\parallel}$	$Q_{\perp}$	$Q_{\parallel}$	$Q_{\perp}$	$Q_{\parallel}$	$Q_{\perp}$
0.5	0.25	3.055	0.089	0.316	0.016	0.236	0.015	5.596	0.093	7.486	0.033
0.6	0.21	1.285	0.021	0.155	0.009	0.129	0.008	6.874	0.032	6.247	0.019
0.7	0.18	0.431	0.010	0.089	0.006	0.077	0.005	5.301	0.017	4.031	0.012
0.8	0.16	0.261	0.005	0.056	0.004	0.050	0.004	3.416	0.010	2.448	0.008
0.9	0.14	0.133	0.004	0.037	0.003	0.034	0.002	1.957	0.006	1.533	0.005
1.2	0.11	0.045	0.002	0.015	0.001	0.014	0.001	0.352	0.002	0.501	0.002
1.4	0.09	0.026	0.001	0.009	0.001	0.009	0.001	0.146	0.001	0.285	0.001
1.8	0.07	0.012	0	0.004	0	0.004	0	0.060	0.001	0.119	0.001
2.2	0.06	0.006	0	0.002	0	0.002	0	0.030	0	0.061	0.001
3.0	0.04	0.002	0	0.001	0	0.001	0	0.011	0	0.022	0
4.2	0.03	0.001	0	0	0	0	0	0.004	0	0.008	0
6.0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.002	0	0.003	0

близкие значения  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$  для Si и  $n=4$ ,  $x=0$ , с одной стороны, и для Se и AgCl с  $n=2$ ,  $x=0$ , с другой стороны, что связано с близкими значениями показателя преломления  $n$ . Относительно большие значения  $Q_{\parallel}$  при  $x=0.25$  и  $x=0.21$  для цилиндров из Si и соответственно для случая  $n=4$ ,  $x=0$  связаны с наличием сильных резонансных максимумов.

Из всего вышеизложенного следует, что наибольшую величину дихроизма при рассеянии света на цилиндрических частицах можно получить в первую очередь на металлических цилиндрах. Максимальный дихроизм наблюдается при малых  $x$ , т. е. когда  $\Delta > a$ , что соответствует эффекту Герца [3] при котором  $Q_{\parallel} > Q_{\perp}$  — поглощение вдоль длинной оси цилиндра больше, чем в перпендикулярном направлении.

При рассеянии света на цилиндре из полупроводника значительный дихроизм можно получить при большом показателе преломления в области сильного поглощения. Однако больших значений  $n$  и  $x$  недостаточно, необходимо, чтобы соблюдалось условие  $\lambda > a$ . Это связано с тем, что по мере увеличения  $x$  значения  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$  сближаются и стремятся к предельному значению  $-2$  (рис. 3). Стремление  $Q_{\text{осл.}}$  к 2 по мере увеличения размеров частиц рассмотрено в [7].

### Разделение ослабления на рассеяние и поглощение

Для выяснения природы процесса ослабления при падении света на цилиндрическую частицу важно выяснить, какую долю ослабления составляет рассеяние и какую поглощение. Как уже указывалось выше, подобное разделение было проведено и для расчетов с упрощенными оптическими постоянными, результаты которых приведены в [6].

При малом поглощении  $x=0.2$  все резонансные максимумы на кривых ослабления связаны в основном с рассеянием. В качестве примера на рис. 4 приведены кривые ослабления, рассеяния и поглощения для случая  $n=4$ ,  $x=0.2$ . Из кривых видно, что поглощение составляет меньшую часть ослабления, и также как рассеяние вносит свою долю в резонансные максимумы на кривых ослабления — положение максимумов  $Q_{\text{погл}}$  совпадает с положением максимумов на кривых ослабления и рассеяния.

При увеличении поглощения до  $x=2-4$  и при  $n=2-4$  наблюдается характерный ход кривых поглощения и рассеяния: при малых  $x$  ( $x < 0.3$ ),

поглощение в параллельном луче превышает рассеяние  $Q_{\parallel \text{погл.}} > Q_{\parallel \text{рас.}}$ . Однако  $Q_{\perp \text{погл.}}$  и  $Q_{\perp \text{рас.}}$  примерно одной величины и имеют одинаковую зависимость от  $x$  (рис. 5). При  $x=1$  происходит смена знака дихроизма для поглощения. При дальнейшем увеличении наблюдается равномерный ход как  $Q_{\text{рас.}}$ , так и  $Q_{\text{погл.}}$ , причем значения факторов эффективности рассеяния больше, чем факторов эффективности поглощения.

Разделение  $Q_{\text{осл.}}$  на  $Q_{\text{рас.}}$  и  $Q_{\text{погл.}}$  для металлов показывает, что поглощение играет все меньшую роль по сравнению с рассеянием, что

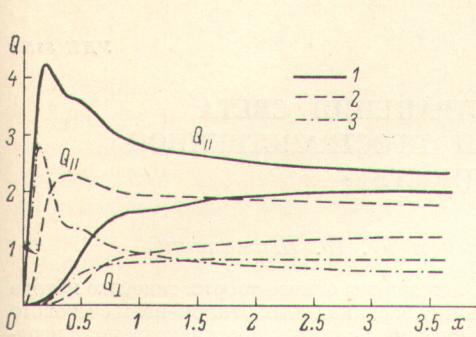


Рис. 5. Кривые ослабления, рассеяния и поглощения для цилиндрических частиц с оптическими постоянными  $n=2$ ,  $x=4$ .

1 —  $Q_{\text{осл.}}$ , 2 —  $Q_{\text{рас.}}$ , 3 —  $Q_{\text{погл.}}$ .

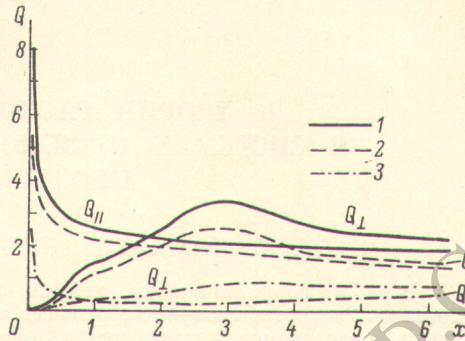


Рис. 6. Кривые ослабления, рассеяния и поглощения для цилиндрических частиц ртути ( $a=100$  нм).

1 —  $Q_{\text{осл.}}$ , 2 —  $Q_{\text{рас.}}$ , 3 —  $Q_{\text{погл.}}$ .

видно из рис. 6. Для цилиндров из Al превышение рассеяния над поглощением (особенно в области малых  $x$ ) выражено еще более четко.

Таким образом, основную роль в ослаблении потока излучения, падающего на металлический цилиндр, играет рассеяние. Доля рассеяния увеличивается по мере увеличения  $n$  и  $x$ , что связано с увеличением коэффициента отражения материала цилиндра. Фактически при рассеянии света на металлическом цилиндре наблюдается не дихроизм, а дитиндализм [15] — различное рассеяние в двух перпендикулярных направлениях. Дитиндализм лежит в основе рассеивающих поляризаторов, состоящих из ориентированных анизометричных частиц, в тех случаях, когда сами частицы не обладают собственным дихроизмом.

Автор выражает благодарность Г. И. Дистлеру и Б. Н. Гречушникову за постоянный интерес и помощь при проведении работы.

#### Литература

- [1] В. Н. Лебедева, Г. И. Дистлер, Б. Н. Гречушников. ДАН СССР, 167, 556, 1966.
- [2] В. Н. Лебедева, Г. И. Дистлер. Опт. и спектр., 23, 968, 1967.
- [3] В. Н. Лебедева. Опт. и спектр., 32, 772, 1972.
- [4] Г. И. Дистлер, А. В. Котов, Е. И. Кортукова, В. Н. Лебедева. Опт. и спектр., 20, 541, 1966.
- [5] В. Н. Лебедева, Г. И. Дистлер, Н. М. Борисова, Ю. М. Герасимов. Коллоид. ж., 31, 405, 1969.
- [6] В. Н. Лебедева. Опт. и спектр., 32, в. 5, 1972.
- [7] Р. ван-де-Хюлст. Рассеяние света малыми частицами, ИЛ, М., 1961.
- [8] Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. Оптические материалы для инфракрасной техники. Изд. «Наука», М., 1965.
- [9] R. S. Caldwell, H. T. Fan. Phys. Rev., 114, 664, 1959.
- [10] C. D. Salzberg, J. J. Villa. J. Opt. Soc. Am., 47, 244, 1957; W. C. Dash, R. Newman. Phys. Rev., 99, 1154, 1955.
- [11] В. Г. Падалка, И. Н. Шкляревский. Опт. и спектр., 11, 527, 1961.
- [12] L. G. Schulz. J. Opt. Soc. Am., 47, 65, 1957.
- [13] В. Г. Падалка, И. Н. Шкляревский. Опт. и спектр., 12, 291, 1962.
- [14] L. G. Schulz, J. Opt. Soc. Am., 44, 365, 1954; А. И. Головашкин, Г. П. Мотулевич, А. А. Шубин. ПТЭ, № 5, 74, 1960.
- [15] Н. А. Толстой, П. П. Феофилов. ДАН СССР, 66, 617, 1949.

Поступило в Редакцию 12 мая 1971 г.